

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Realizace laditelného filtru založeného na Braggovských mřížkách
Implementation of Tunable Filter Based on Fiber Bragg Gratings**

2017

Patrik Binder

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Patrik Binder**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika
Téma: Realizace laditelného filtru založeného na Braggovských mřížkách
Implementation of Tunable Filter Based on Fiber Bragg Gratings
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Optovláknová Braggovská mřížka se využívá napříč celou oblastí optiky. Typickým příkladem pak mohou být optovláknové filtry, které se využívají například ve vlnovém multiplexu. Cílem práce je pochopení problematiky laditelných filtrů založených na Braggovské mřížce a jeho realizace.

- Studium a popis optovláknových filtrů a Braggovských mřížek
- Návrh a realizace laditelného filtru založeného na Braggovských mřížkách
- Experimentální ověření funkčnosti laditelného filtru

Seznam doporučené odborné literatury:


OTHONOS, Andreas, Kyriacos KALLI a Francis T YU. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boston, Mass.: Artech House, 1999, xiv, 422 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 08-900-6344-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marcel Fajkus**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 27. apríla 2017



.....

podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Marcelovi Fajkusovi za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Bakalárska práca je venovaná téme optovláknovej Braggovskej mriežke, ktorá sa využíva naprieč celou oblasťou optiky. Hlavným cieľom práce je na základe teoretických poznatkov, ktoré sú popísané v prvých troch kapitolách, navrhnuť a realizovať laditeľný filter založený na Braggovskej mriežke. Návrh a realizácia je vo finálnej časti doplnená experimentálnym overením funkčnosti laditeľného filtra.

Teoretická časť, ktorá je rozdelená do niekoľkých kapitol sa zaoberá optickou Braggovskou mriežkou, jej výrobou, parametrami a využitím v optických vláknach. Druhá kapitola je venovaná optickým filtrom, ich výrobe a rozdeleniu. Posledná, tretia kapitola teoretickej časti popisuje Peltierov článok, ktorý je použitý v praktickej časti bakalárskej práce.

V praktickej časti sa experimentálne overuje funkčnosť laditeľného filtra, konkrétne citlivosť a rozsah nastavenia vlnovej dĺžky.

Kľúčové slová

Braggovská mriežka, interferometer, spektrálny optický filter, optické vlákno, Peltierov článok, laditeľný filter, vlnová dĺžka, Arduino Nano, spektrálny analyzátor.

Abstract

The bachelor theses is dealing with the subject of optofibre Fiber Bragg grating, which is used through the whole field of optics. The main aim of the theses, based on theoretical findings which are described in the first three chapters, is to design and implement a tunable filter based on Bragg's grid. The design and implementation is, in the final part, completed by experimental verification of the functioning of the tunable filter.

Theoretical part, which is divided into several chapters, is dealing with the optical Bragg's grid, its manufacture, parameters and usage in the optical fibres. Second chapter is dedicated to optical filters, its manufacture and division. The last, third chapter of the theoretical part is describing Peltier's segment, which is used in the practical part of the bachelor theses.

The functioning of the tunable filter is experimentally verified in the practical part of the theses. Specifically the sensitivity and range of the setting of the wavelength.

Key words

Fiber Bragg grating, interferometer, spectral optical filter, optical fiber, Peltier's clutch, tunable filter, wavelength, Arduino Nano, spectral analyzer.

Obsah

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV.....	- 9 -
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK.....	- 10 -
ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ A ZOZNAM TABULIEK	- 11 -
ÚVOD.....	- 13 -
1 OPTICKÁ VLÁKNOVÁ BRAGGOVSKÁ MRIEŽKA	- 14 -
1.1 PRINCÍP BRAGGOVSKEJ MRIEŽKY	- 14 -
1.2 PARAMETRE BRAGGOVSKEJ MRIEŽKY	- 15 -
1.3 VYUŽITIE FBG V OPTICKEJ SIETI	- 16 -
1.4 VYUŽITIE FBG V SENZORICKÝCH APLIKÁCIÁCH	- 17 -
1.5 VÝROBA FBG.....	- 17 -
1.5.1 FÁZOVO-MASKOVACIA METÓDA	- 17 -
1.5.2 METÓDA BOD PO BODE.....	- 19 -
2 OPTICKÉ FILTRE	- 20 -
2.1 VÝROBNÉ TECHNOLOGIE OPTICKÝCH FILTROV.....	- 21 -
2.2 SPEKTRÁLNE OPTICKÉ FILTRE	- 21 -
2.2.1 BRAGGOVSKÁ MRIEŽKA	- 21 -
2.3 INTERFEROMETRICKÉ FILTRE	- 22 -
2.3.1 FABRY-PEROTOV FILTER.....	- 23 -
2.3.2 SAGNACOV INTERFEROMETER	- 24 -
2.3.3 MICHELSONOV INTERFEROMETER.....	- 25 -
2.3.4 MACH-ZEHNDEROV INTERFEROMETER	- 26 -
3 PELTIEROV ČLÁNOK.....	- 28 -
3.1 VÝHODY A NEVÝHODY PELTIEROVÝCH ČLÁNKOV	- 29 -
3.2 VYUŽITIE PELTIEROVÝCH ČLÁNKOV.....	- 29 -
4 NÁVRH LADITEĽNÉHO FILTRA ZALOŽENÉHO NA BRAGGOVSKEJ MRIEŽKE	- 31 -
4.1 PROGRAMOVANIE ARDUINO NANO	- 32 -
5 OVERENIE FUNKČNOSTI LADITEĽNÉHO FILTRU	- 35 -
5.1 KALIBRÁCIA BRAGGOVSKEJ MRIEŽKY	- 35 -
5.2 ČASOVÁ STÁLOSŤ VLNOVEJ DĹŽKY	- 37 -
5.3 NASTAVITEĽNÝ ROZSAH VLNOVEJ DĹŽKY LADITEĽNÝM FILTROM	- 38 -
5.4 ABSOLÚTNA CHYBA LADITEĽNÉHO FILTRA VOČI OSA	- 39 -
5.5 CITLIVOSŤ NASTAVENIA LADITEĽNÉHO FILTRA.....	- 40 -
ZÁVER	- 41 -
POUŽITÁ LITERATÚRA.....	- 42 -

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
Λ	s	Periódá
D	M	Vzdialenosť
$\Delta\lambda_B$	M	Zmena Braggovskej vlnovej dĺžky
ΔT	°C	Rozdiel teplôt
Δ_{ABS}	m	Absolútna chyba navrhnutého filtra
$g(z)$	-	Apodizovaná funkcia
k_T	m	Teplotný koeficient
K_ε	pm/ μ i	Deformačná citlivosť
K_T	μ i/°C	Teplotná citlivosť
L	M	Dĺžka mriežky
Λ	M	Vlnová dĺžka
λ_0	M	Počiatočná vlnová dĺžka
λ_{Max}	M	Maximálna Braggovská vlnová dĺžka
λ_{Min}	M	Minimálna Braggovská vlnová dĺžka
λ_{B_OSA}	M	Nameraná Braggovská vlnová dĺžka spektrálnym analyzátorom
λ_{B_filtra}	M	Vypočítaná Braggovská vlnová dĺžka navrhnutým filtrom
I	m	Interferencia lúča
N	-	Index lomu vlákna
Π	-	Ludolfovo číslo
ε	l	Deformácia
T_0	°C	Počiatočná teplota
V	-	Normalizovaná frekvencia
Θ	°	Uhol

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
BP	Bakalárska práca
FBG	Fiber Bragg Grating – vláknová Braggovská mriežka
FWHM	Rozsah funkcie daná rozdielom medzi dvoma extrémnymi hodnotami nezávislej premennej, pri ktorej je závislá premenná rovná polovici jeho maximálnej hodnoty
OSA	Spektrálny analyzátor OSA 203
UV	Ultrafialové svetlo
WDM	Vlnovo delený multiplex

Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek

Číslo ilustrácie	Názov ilustrácie	Číslo stránky
1.1	Zobrazenie Braggovskej mriežky v optickom vlákne	14
1.2	Zmeny indexov lomu vo vláknovej Braggovskej mriežke	15
1.3	Delenie žiarenia cez fázovú masku	18
1.4	Schéma fázovacej masky pre kolmý dopad UV žiarenia	18
1.5	Metóda bod po bode, metóda s homogénnymi segmentami	19
2.1	Popis optického filtra	20
2.2	Popis FBG v optickom vlákne	22
2.3	Pozitívna interferencia, sčítaním dvoch vln s rovnakou fázou vzniká nová silnejšia interferencia	23
2.4	Sčítaním dvoch vln s opačnou fázou dochádza k úplnému zániku vlnenia	23
2.5	Fabry-Perotov interferometer	24
2.6	Sagnacov interferometer	25
2.7	Michelsonov interferometer	26
2.8	Mach-Zehnderov interferometer	27
3.1	Peltierov článok	28
3.2	Prierez Peltierovým článkom	28
3.3	Zloženie Peltierovho článku	29
3.4	Využitie Peltierovho článku s Braggovskou mriežkou v BP	30
4.1	Zapojenie Arduino Nano na základnej doske	31
4.2	Arduino Nano V3.1 použité na doske plošného spoja	32
4.3	Zapojenie Peltierovho článku s chladičom a ventilátorom	33
4.4	Základná doska laditeľného filtra uložená v krabičke	34
4.5	Uloženie optického vlákna v krabičke laditeľného filtra	34
5.1	Graf vplyvu teploty na vlnovú dĺžku Braggovskej mriežky	36
5.2	Schéma zapojenia pre kalibráciu Braggovskej mriežky	36

Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek

5.3	Graf časovej stálosti pri nastavenej vlnovej dĺžke	37
5.4	Graf časovej stálosti pre nastavenú vlnovú dĺžku 1555.675 nm	38
5.5	Absolútna chyba laditeľného filtra voči OSA	39
5.6	Zvyšovanie vlnovej dĺžky v závislosti na teplote	40

Číslo tabuľky	Názov tabuľky	Číslo stránky
5.1	Nastaviteľný rozsah vlnovej dĺžky	39
5.1	Hodnoty namerané OSA a navrhnutým filtrom	40

Úvod

Ľudstvo stále napreduje a vymýšľa nové technológie, ktoré zjednodušujú a urýchľujú čas potrebný na rýchlejšiu komunikáciu s okolím. Doteraz ľuďom a firmám postačovali pôvodné siete ako napr. z metalického vedenia, v súčasnosti však existuje náhrada za tieto pôvodné vedenia novými optickými vedeniami. Začínajú vznikať optické siete. Na komunikáciu prostredníctvom optickej siete je treba hlavne kvalitné optické zosilňovače, zdroje svetla, optické filtre, multiplexory a demultiplexory.

Témou bakalárskej práce je problematika laditeľných filtrov založených na Braggovskej mriežke. Optovláknová Braggovská mriežka sa využíva celou oblasťou optiky. Príkladom sú optovláknové filtre, ktoré sa využívajú vo vlnovom multiplexe. Cieľom práce je na základe teoretických poznatkov problematiky optovláknových filtrov a Braggovských mriežok, vytvoriť návrh pre laditeľný filter založený na Braggovskej mriežke a následne realizovať tento návrh. Súčasťou cieľa je finálne experimentálne overenie funkčnosti tohto laditeľného filtra.

Braggovska mriežka predstavuje krátky úsek v optickom vlákne a odráža určité svetelné paprsky. V teoretickej časti bakalárskej práce je opísaná táto optická mriežka, princíp jej fungovania, parametre, využitie v optickej sieti a v senzorických aplikáciách. Prvá kapitola je doplnená o metódy používané pri výrobe optickej Braggovskej mriežky.

Optické filtre sú jedinečnou súčasťou pre optické siete. Prostredníctvom nich je možné vykonávať filtráciu potrebnej vlnovej dĺžky. Existuje veľké množstvo optických filtrov, či už neladiteľných, ktoré sú navrhnuté pre konkrétnu aplikáciu alebo laditeľné, ktoré si môže používateľ nastaviť podľa potreby. V druhej teoretickej kapitole bakalárskej práce je popísaných niekoľko druhov optických filtrov, ktoré sú rozdelené na spektrálne a interferometrické.

Teoretická časť je doplnená o Peltierové články, s popisom ich výhod, nevýhod a využitím v praxi.

Štvrtá a piata kapitola je venovaná návrhu už konkrétneho laditeľného filtra založeného na Braggovskej mriežke, jeho realizácii a následné overeniu jeho funkčnosti. V praktickej časti bola tiež overená časová stálosť a maximálny rozsah vlnovej dĺžky nastavenej navrhnutým filtrom. Následne bola určená absolútna chyba merania laditeľného filtra v porovnaní so spektrálnym analyzátorom.

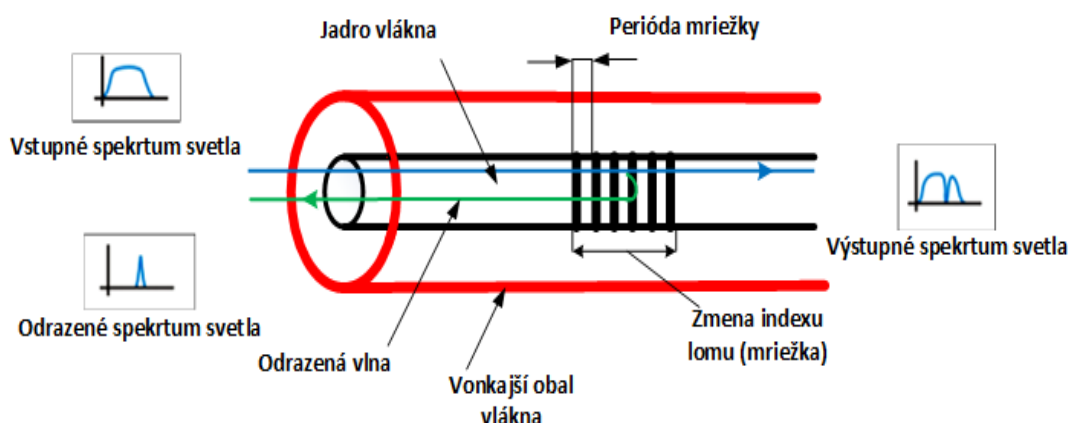
1 Optická vláknová Braggovská mriežka

V dnešnej dobe je prenos dát oveľa rýchlejší ako niekoľko rokov dozadu. Veľký podiel ma na tom hlavne využívanie optického vlákna. Ako materiál na výrobu optického vlákna sa používa sklo, pri výbere vhodnej technológie dokáže toto vlákno preniesť teoreticky dáta neobmedzenou rýchlosťou. Jedno zo zariadení, ktoré sa využívajú v optike je aj Braggovská mriežka (FBG – Fiber Bragg gratings).

Vláknová Braggovská mriežka bola vyvinutá na konci 70-tych rokov 20. storočia. Ken Hill ako prvý demonštroval zmeny indexov lomu v germániovokremíkovom optickom vlákne na vstupe bol pri tom intenzívny lúč svetla. Rok 1989 bol prelomový pre vývoj FBG, kedy bola prezentovaná nová technológia na výrobu FBG pomocou UV. Táto metóda spočívala v jednoduchšom vytváraní požadovanej zmeny indexu lomu, čo prinieslo možnosť aplikovať apodizáciu a čirpovanie. UV žiarenie je na rozmedzí vlnovej dĺžky od 100 nm do 400 nm. Tvorí ho neviditeľná časť spektra elektromagnetického žiarenia. Po roku 1995 začal rásť záujem o FBG v oblasti vláknovej optiky.

1.1 Princíp Braggovskej mriežky

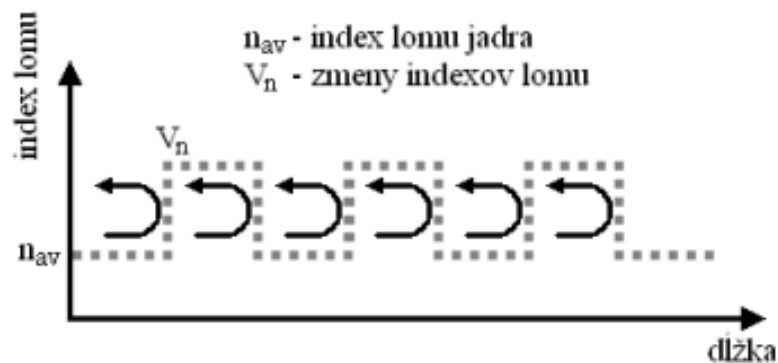
Braggovská mriežka sa skladá z periodických zmien indexov lomu, ktoré sú pozdĺž osy vlákna s určitou periódou a amplitúdou. Obsahuje už konkrétne optické vlákno, ktoré sa zapája na určité miesto v danej optickej sieti. FBG je technológia, ktorá sa aplikuje na optické vlákno, kde dochádza k periodickej zmene fázy a intenzite prechádzanej alebo odrazenej svetelnej vlny. Princíp Braggovskej mriežky je zobrazený na obrázku 1.1, na vstupe do optického vlákna je intenzívny lúč svetla. Braggovskou mriežkou teda prechádza žiarenie, ktoré má určitú vlnovú dĺžku a dopadá na segmenty, z ktorých je zložená Braggovská mriežka. Koherentné žiarenie sa potom odráža od týchto segmentov na základe nastaveného indexu lomu.



Obrázok 1.1: Zobrazenie Braggovskej mriežky v optickom vlákne

1.2 Parametre Braggovskej mriežky

Hlavné parametre Braggovskej mriežky sú teda modulácia indexu lomu jadra, Braggovská vlnová dĺžka, apodizačná funkcia, modulácia indexu lomu, čirp a odrazivosť vlnovej dĺžky.



Obrázok 1.2: Zmeny indexov lomu na vláknovej Braggovskej mriežke

Relatívny index lomu definujeme rozdielom Δ .

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (1.3)$$

Bezrozmerný parameter V tzv. normalizovaná frekvencia.

$$V = \frac{2\pi a}{\gamma} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong a k n_2 \sqrt{2\Delta} \quad (1.4)$$

V rovnici normalizovanej frekvencie predstavuje a polomer jadra, λ predstavuje vlnovú dĺžku, $k = 2\pi/\lambda$. Parameter V udáva, ako ďaleko je od „cutoff“ režimu (stav, keď režim už nie je vedený).

Rozdelenie indexu lomu vlákna podľa osy $n(z)$.

$$n(z) - n_0 = \Delta n_{ac}(z) \cos\left(\frac{2\pi z}{d} + \theta(z)\right) + \Delta n_{dc}(z) \quad (1.5)$$

V rovnici, z je postavenie, n_0 je index lomu predchádzajúceho mriežkového zápisu, Δn_{ac} je index lomu amplitúdovej modulácie, θ perióda čirpu a Δn_{dc} je priemerná zmena indexu lomu.

Vo WDM demultiplexoroch dochádza vnútrokanalovému rušeniu pokiaľ má FBG rovnomerne rozložený index lomu. A to hlavne ak existujú významné postranné maximá. Tieto postranné maximá dokážeme znížiť Braggovskou mriežkou s apodizovaným profilom, to znamená že apodizovaná funkcia $g(z)$ klesá k okrajom mriežky. Postranné maximá nám môžu spôsobovať šumy.

$$g(z) = \exp \left[-a \left(\frac{z - \frac{L}{2}}{L} \right)^2 \right] \quad (1.6)$$

V rovnici, L predstavuje dĺžku mriežky, a zas šírkový parameter.

Vlnovú dĺžku Braggovskej mriežky vypočítame zo vzťahu:

$$\lambda_b = 2n\Lambda, \quad (1.7)$$

kde, λ_b je Braggová vlnová dĺžka, n je efektívny index lomu jadra vlákna. Efektívny index lomu kvantifikuje rýchlosť šírenia svetla v porovnaní s jeho rýchlosťou vo vákuu a Λ je vzdialenosť medzi mriežkami. Vlnová dĺžka je vzdialenosť medzi opakujúcimi sa periódami vlnenia. Závisí od frekvencie vlnenia a rýchlosti šírenia vlny.

Rozlišujeme dva druhy Braggovských mriežok, tie ktoré pracujú na malých vlnových dĺžkach majú názov mriežky s krátkou periódou – short period grating a mriežky, ktoré pracujú s vyššou hodnotou mriežky tj. dlhou periódou – long-period gratings. Vlny, ktoré sa odrazia na určitých vlnových dĺžkach zo segmentov sa spoja a vytvoria jedno odrazené žiarenie. Tá časť, ktorá nebola odrazená pokračuje ďalej. Podľa nastavenia segmentov v Braggovskej mriežke, t.j. aké pásmo prepustia (odrazia) môžeme mriežky rozdeliť do dvoch skupín. Reflektančné, mriežky ktoré väčšiu časť žiarenia odrážajú a transmitančné, kde sa väčšia časť žiarenia prenáša ďalej cez FBG.

1.3 Využitie FBG v optickej sieti

Braggovské mriežky sa využívajú v optických sieťach na vyfiltrovanie určitej vlnovej dĺžky pri prechode svetla optickým vláknom. Tým že časť svetla sa cez Braggovskú mriežku prepustí a časť sa odrazí (obrázok 1.1), je možné použiť Braggovskú mriežku ako filter. Braggovskú mriežku je možné použiť aj vo WDM (Wavelength Division Multiplex – vlnovo delený multiplex). To je možné tým, že cez FBG môžeme kombinovať rôzne vlnové dĺžky na viacerých kanáloch do jedného kanála a môže byť prenášané cez jedno optické vlákno. Týmto spôsobom je možné zvýšiť kapacitu optických sietí bez použitia viacerých káblov. Cez jedno optické vlákno môžeme zabezpečiť obojsmernú komunikáciu. Braggovské mriežky majú v telekomunikáciách viacero využití, a to ako laserové reflektory a prvky kompenzujúce disperziu. Využitie môžu mať tiež aj ako optické multiplexory a demultiplexory alebo optické add-drop multiplexory.

1.4 Využitie FBG v senzorických aplikáciách

Jedno z najčastejšie používaných a široko rozmiestnených optických snímačov je vlákno Braggovskej mriežky, ktoré zodpovedá vlnovej dĺžke svetla, ktorá sa mení v závislosti na kolísaní teploty alebo natiahnutí mriežky. Preto je možné Braggovskú mriežku aplikovať v senzorovej technike, na snímanie tlaku, teploty. Príkladom využitia môže byť počítanie vozidiel, kde optický senzor zachytáva vibrácie vyvolané prechádzajúcimi vozidlami, to sa prevedie na frekvenčné zmeny optického výkonu vo vlákne. V súčasnosti neexistuje veličina, ktorá by sa nedala merať vláknovými optickými senzormi.

V prípade ovplyvnenia zmenou teploty je možné zmenu odrazenej vlnovej dĺžky FBG vyjadriť vzťahom

$$\Delta\lambda(\epsilon, T) = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_T\Delta T. \quad (1.8)$$

K_ϵ a K_T sú konštanty získané od výrobcu Braggovskej mriežky alebo teplotnou kalibráciou. K_ϵ je deformačná citlivosť, K_T je teplotná citlivosť a ϵ je deformácie mriežky.

1.5 Výroba FBG

Výroba Braggovských mriežok je technologicky náročná. Sklenené sklo musí byť chemicky ošetrené a upravené pomocou UV žiarenia alebo lasera, kedy docielime upravenie indexu lomu jadra vlákna a tiež štruktúru jadra vlákna. Pre dosiahnutie fotosenzitivity sa do zmesi kremíka primiešava germánium. Vďaka fotosenzitivite optického vlákna je potom vlákno citlivé na UV žiarenie, ktoré vo vlákne vytvára neustále zmeny indexu lomu. Na základe toho aký spôsob bol pri výrobe Braggovskej mriežky použitý, môžeme doceliť väčšiu odolnosť voči vonkajším vplyvom.

Je viacero postupov pri výrobe FBG. Jeden z jednoduchých postupov výroby FBG pre zachovanie pevnosti je Cold-writing, táto technika výroby umožňuje vláknu si ponechať svoju pevnosť a znižuje tak poškodenie vlákna vplyvom lomu. Mriežka je exponovaná priamo cez plastový obal, pretože štandardne sú používané obaly sú priehľadné. Pri tejto výrobe sa používa UV laser na zápis mriežky do vlákna.

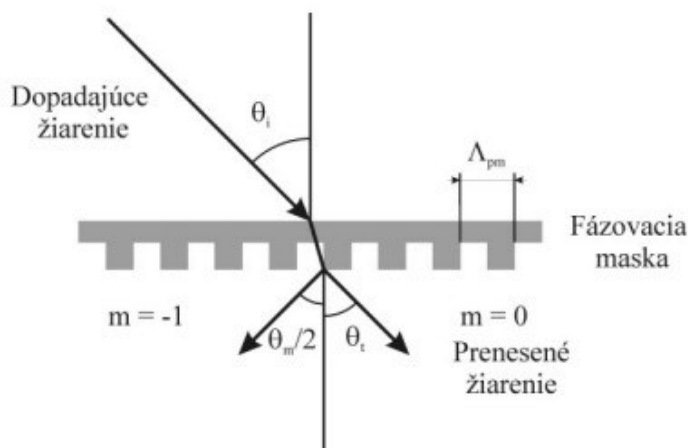
Najpoužívanejšie metódy pri výrobe Braggovskej mriežky je fázovo maskovacia metóda, metóda bod po bode, a metóda interferencie svetla.

1.5.1 Fázovo-maskovacia metóda

Použitím tejto metódy došlo k značnému zjednodušeniu pri zápise vláknovej mriežky ako časti interferometra. Štruktúra jadra vlákna sa mení prostredníctvom UV žiarenia, ktoré prechádza cez fázovú masku. Intenzita, polomer a tiež hĺbka vrtania musí byť kontrolovaná. Reliéf masky musí mať presne určený pomer prietrž-medzera a tiež aj hĺbku vrtania. Pre oblasť UV žiarenia, musí byť kremenné sklo priepustné. Z kremenného skla je vyleptaný reliéf na doske, z ktorého je tvorená fázová maska v priepustnom režime. Žiarenie, ktoré prichádza cez túto masku je rozdelené do niekoľkých radov $m = 0, \pm 1, \pm 2$, s periódou λ_{pm} , ktorá je závislá od Braggovskej vlnovej dĺžky a móde efektívneho odrazu:

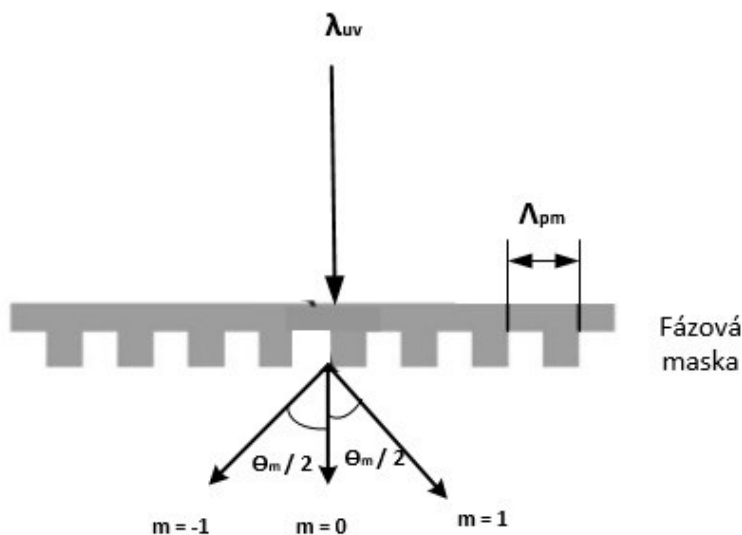
$$\lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\left(\sin\frac{\theta_m}{2} - \sin\theta_i\right)}, \quad (1.1)$$

kde $\theta_m/2$ predstavuje uhol rozloženého rádu a θ_i nám určuje pod akým uhlom dopadá prichádzajúce žiarenie, λ_{uv} je vlnová dĺžka.



Obrázok 1.3: Delenie žiarenia cez fázovú masku

Ak sa bude vlnová dĺžka rovnáť jej polovici, žiarenie sa rozdelí do rádu $m = -1$ a ak dopadá svetlo kolmo na masku $\theta_i = 0$, dopadajúce svetlo sa rozdelí ešte do λ_{pm} rádo, $m = 0, \pm 1$, tak ako je to na Obrázku 1.3.

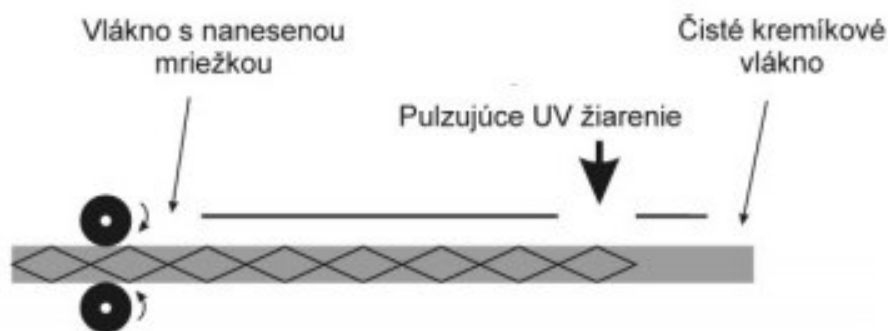


Obrázok 1.4: Schéma fázovacej masky pre kolmý dopad UV zväzku

Aby bolo vrývanie účinnejšie musí byť rozdelenie žiarenie na interferenčný vzor rovnomerné. Ak by bolo potrebné je možné na mriežku je možné použiť antireflexnú vrstvu a to z dôvodu redukcie odrazu. To môže mať za následok zhoršenie interferenčných odrazov.

1.5.2 Metóda bod po bode

Z názvu je už zrejmé, že mriežka sa vyrába postupnou metódou. Tento typ výroby je často používaný na výrobu mriežok s dlhou periódou. Výroba umožňuje úplnú kontrolu polohy každej modifikácie, ktorá obsahuje mriežku. Časti mriežok sú nanášané postupne po jednom segmente cez jeden bod, prostredníctvom ktorého dopadá na mriežku UV žiarenie. Pri tomto spôsobe musí byť dodržaná vzdialenosť periód mriežky a intenzita UV žiarenia. Postupným ťahaním vlákna a posúvaním vzniká vo vlákne mriežka. UV žiarenie na mriežku dopadá cez bod, ktorý je ovládaný mikro umiestňovačom, ktorý umiestni presne daný bod.

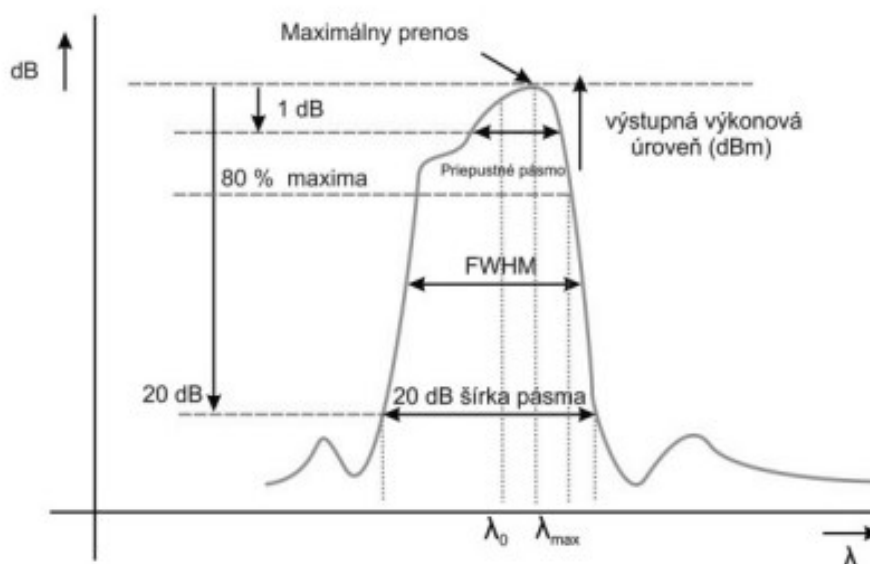


Obrázok 1.5: Metóda bod po bode, vlákno s homogennými segmentami

Tento typ mriežky má homogénnu štruktúru, to znamená, že veľkosť mriežkovej periódy λ sa nemení, ak bude rásť dĺžka mriežky. Dôraz je hlavne na šírke pásma, ktoré ovplyvňuje konštanta k . Pokiaľ sa táto konštanta zväčšuje, zväčšuje sa aj šírka pásma.

2 Optické filtre

Prostrediu, ktoré zadržiava spektrálne oblasti a prepúšťa určitú oblasť spektra svetelných vln hovoríme optický filter. Optický filter patrí medzi základný komponent pre aspoň dve aplikácie, a to multiplexovanie a demultiplexovanie vlnových dĺžok, vyrovnávanie výkonových úrovní optických signálov. Pomocou optických filtrov môžeme dosiahnuť prepúšťanie, pohltenie alebo odrazenie vlnovej dĺžky. Štandardné parameter filtrov ako napr. maximálny prenos, šírka preneseného pásma alebo FWHM, čo je vlastne spektrálna šírka pri polovičnej amplitúde, si môžeme ukázať na obr. 5. Zmeny v zložení svetla, ktoré prešlo filtrom môžu byť spôsobené absorpciou, interferenciou, rozptylom alebo tiež aj polarizáciou. V závislosti od kvality povrchu a uhla, pod ktorým svetlo dopadá na filter, dochádza k čiastočnému odrazu od povrchu filtra. Využitie optických filtrov môže byť rôzne, ako napríklad v komunikačných systémoch optických vlákna FTTx, WDM systémy, vláknové zosilňovače, meracie prístroje alebo v lekárskom vybavení.



Obrázok 2.1: Popis optického filtra

Maximálny prenos, označovaný aj ako TPK, predstavuje maximálne percento prepusteného svetla vo vnútri priepustného pásma.

FWHM – plná šírka v polovici maxima, je rozsah funkcie daná rozdielom medzi týmito dvoma extrémnymi hodnotami nezávislej premennej, pri ktorej je závislá premenná rovná polovici jeho maximálnej hodnoty. Centrum vlnovej dĺžky λ_0 predstavuje stred pásma FWHM.

2.1 Výrobné technológie optických filtrov

Optické filtre môžeme rozdeliť podľa vlastností do dvoch hlavných kategórií a to tie, ktoré majú absorpčné vlastnosti a dichroické vlastnosti. Rozdelenie nie je podľa toho čo majú filtre filtrovať, ale akým spôsobom.

1. **Absorpčné filtre** svetlo blokujú na základe absorpčných vlastností. To znamená, že svetlo, ktoré je zadržané vo filtri a neodráža sa mimo filtra. Výhodou týchto filtrov je možnosť dopadu svetla z rôzneho uhla a filter bude naďalej udržiavať jeho prenos a absorpčné vlastnosti.
2. **Dichroické filtre** odrážajú nežiadúce vlnové dĺžky, pri prenose požadovanej časti spektra. V niektorých aplikáciách môže byť táto požiadavka žiaduca, pretože svetlo môže byť oddelené vlnovou dĺžkou do dvoch zdrojov. Toto dosiahneme pridaním jednej alebo viac vrstiev, z materiálu z rôznych indexov lomu, ktoré využívajú vlastnosti interferencie svetelných vln. V interferenčných filtroch, svetlo, ktoré prichádza z materiálu, ktoré má nižší index lomu bude odrážané ďalej materiálom z vyšším indexom lomu. Iba svetlo z určitého uhla a vlnovej dĺžky bude zasahovať do vstupného lúča a prechádzať skrz materiál.

2.2 Spektrálne optické filtre

2.2.1 Braggovská mriežka

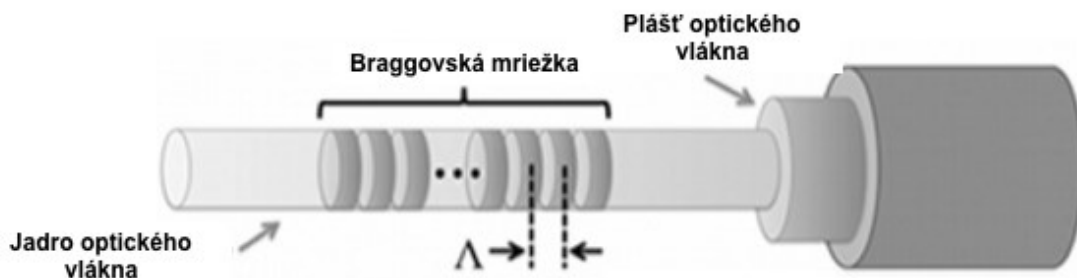
Medzi spektrálne optické filtre patrí Braggovská mriežka. Braggovská mriežka je vytvorená v jadre optického vlákna. Môžeme povedať, že mriežka pracuje ako optický frekvenčný filter. To znamená, že mriežka má na vstupe spektrálne zložky a podľa toho aké má mriežka parametre je časť spektrálnych zložiek prepustená ďalej cez mriežku a druhá časť je odrazená späť.

Dôležitým údajom Braggovskej mriežky je jej rezonančná vlnová dĺžka. Táto vlnová dĺžka určuje ktorá časť svetla vstupujúceho do mriežky je odrazená späť. Braggovská mriežka má je veľmi malá, na dĺžku má (napr.: 1-5 mm), takže sa nenachádza po celej dĺžke optického vlákna, ale len na tej časti vlákna kde ju potrebujeme. Vlnová dĺžka Braggovskej mriežky je závislá od materiálu optického vlákna a taktiež od na perióde mriežky.

Aby sme dosiahli ladenie Braggovskej mriežky (riadenie odrazenej vlnovej dĺžky), musí byť regulovateľná. To je možné niekoľkými metódami, napr. napínaním Braggovskej mriežky, čím sa predlžuje optické vlákno a tým mení periódu (mechanické ladenie). Ďalšou možnou metódou je nahrievanie Braggovskej mriežky (tepelné ladenie). Pri zmene teploty spôsobuje predĺženie Braggovskej mriežky, tým dosiahneme malý rozsah nastavenia. Zmeny v napätí a teplota ovplyvňuje efektívne index lomu a mriežkovú periódu λ v Braggovskej mriežke. To má za následok posun odrazenej vlnovej dĺžky. Zmena vlnovej dĺžky v dôsledku deformácie a teploty môže byť približne popísaná rovnicou:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e) \times \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \times \Delta T; \quad (2.1)$$

kde $\Delta\lambda$ je posun vlnovej dĺžky, λ_0 je počiatočná vlnová dĺžka, p_e predstavuje foto-elastický koeficient a ε je deformácia mriežky. α_Λ je koeficient tepelnej rozťažnosti, opisuje rozšírenie mriežky. α_n je termo-optický koeficient, ktorý opisuje zmeny v indexe lomu. Popis Braggovskej mriežky v jadre optického vlákna môžeme vidieť na obrázku 2.2.

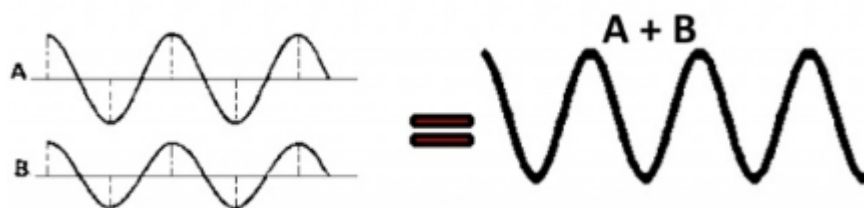


Obrázok 2.2: Popis FBG v optickom vlákne

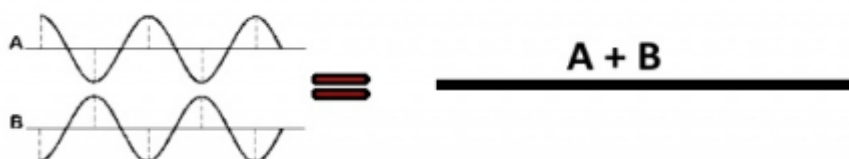
V dnešnej dobe má laditeľná Braggovská mriežka viacero využití ako napr. senzory pre meranie deformácie, teploty, tlaku ale aj v oblasti telekomunikácií, napr. vo vlnovom multiplexe (WDM), kde je viac optických signálov v jednom optickom vlákne a my potrebujeme určitý signál odfiltrovať. Braggovská mriežka má veľmi dobré vlastnosti ktoré reagujú na teplotou pôsobiacu na mriežku. Pomocou teploty vplývajúcou na mriežku sa nám bude meniť perióda mriežky, to znamená, že pomocou teploty si môžeme nastavovať požadovanú vlnovú dĺžku mriežky. Tento jav využíva aj v tejto práci, týmto spôsobom sme dosiahli laditeľnosť Braggovskej mriežky.

2.3 Interferometrické filtre

Interferometrický filter je optický filter, ktorý odráža jednu alebo viac spektrálnych pásiem a prenáša iné, pri zachovaní takmer nulového koeficientu absorpcie pre všetky požadované vlnové dĺžky. Zložený je z niekoľkých tenkých vrstiev dialektrického materiálu, ktorý má rôzne indexy lomu. Tento typ filtra je vyberá vlnovú dĺžku na základe rušivých vplyvov, ktoré prebiehajú medzi dopadajúcim a odrážajúcim vlnovým žiarením s vlnovou dĺžkou na hranici s tenkou vrstvou. Zdrojom tohto filtra je koherentné žiarenie, ktoré dodáva rovnaký výkon žiarenia počas celej doby merania. Toto žiarenie je následne rozdelené na dve časti, kedy každá časť tohto žiarenia prejde rozličnú vzdialenosť, na konci sú obe žiarenia spojené a zhodnotené v detektore. V týchto filtroch sa využíva interferencia, to znamená, že sa spájajú vlny s rôznym fázovým rozdielom (intenzitou). Vo výsledku sa všetky intenzity spočítajú a dostaneme jednu výslednú intenzitu. Týmto spôsobom dochádza ku konštruktívnej interferencii. Vo výsledku nám však môže dôjsť k celkovému stlmeniu. To má za následok ak intenzity vln, ktoré sčítame majú opačnú fázu.



Obrázok 2.3: Pozitívna interferencia, sčítaním dvoch vln s rovnakou fázou vzniká nová silnejšia interferencia



Obrázok 2.4: Sčítaním dvoch vln s opačnou fázou dochádza k úplnému zániku vlnenia

Činnosť tohto filtra si môžeme vysvetliť tak, že máme dva zdroje, z ktorých pochádza koherentné vlnenie a v bode, kde sa vlny stretnú je ich fázový rozdiel $\varphi = \pi$ a výsledná intenzita je $I = 0$, z toho dôvodu, že sa vlny vyrušia navzájom. Ak $\varphi \neq \pi$, tak interferenčný člen sa stratí a intenzita vln sa sčíta. Rovnicu interferencie môžeme teda vyjadriť:

$$I = I_1 + I_2 + 2 (I_1 \times I_2)^{\frac{1}{2}} \cos\varphi \quad (2.2)$$

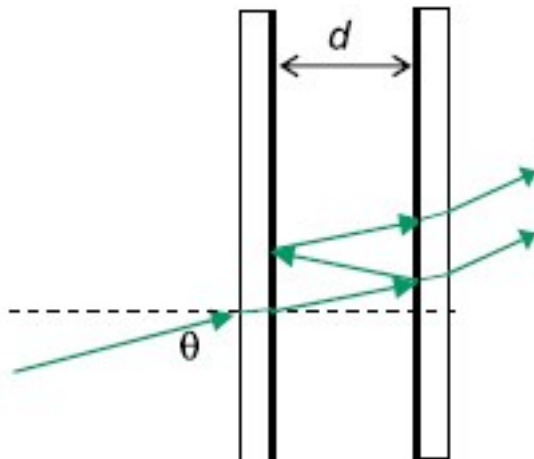
Medzi najdôležitejšie optické filtre patria optické spektrálne filtre. Sú založené na interferenciách, difrakciách, a absorpciách. Funkciou spektrálnych filtrov je rozpoznať úzke pásmo vyžadovanej optickej frekvencie v širokospektrálnom optickom toku a buď frekvenciu posunúť ďalej alebo ju odmietnuť. Používajú sa vo fixných a nastaviteľných filtroch. Spektrálne filtre rozdelíme na:

- a) Laditeľné optické filtre
- b) Neladiteľné optické filtre

2.3.1 Fabry-Perotov filter

Vynálezcami tohto filtra sú Charles Fabry a Alfred Perot. Fábry-Perotov filter sa skladá z transparentnej dosky s dvoma odrazajúcimi povrchmi alebo dvoch paralelne vysoko odrazajúcich zrkadiel. Zrkadlá sú vyrobené v tvare klína, a otočené odrazovou plochou k sebe, kde aspoň jedna z týchto plôch je nastaviteľná z dôvodu vymedzenia priestoru medzi zrkadlami. Tým môžeme meniť vzdialenosť medzi zrkadlami a následne sa bude meniť vlnová dĺžka, ktorú ma interferometer prepúšťať. Meniaci sa prenos funkcie je spôsobený interferenciou medzi mnohonásobnými odrazmi svetla od odrazových povrchov. Časť svetla sa prenáša vždy keď svetlo dosiahne druhý povrch

a druhá časť sa odrazí späť, nastáva tým mnohonásobný odraz. Tieto vlny nie sú rovnaké. Lúče prechádzajú cez tento filter určitou rýchlosťou, ktorú ovplyvňuje viacero faktorov, a to hrúbka použitého etalónu a index lomu, taktiež aj fáza, akú má prenášaný lúč. Najväčšia rýchlosť lúču je vtedy ak je vo fáze a najmenšia ak je mimo fázy. Ako zdroj svetla je znova koherentné žiarenie, pri dopade lúča na zrkadlo sa časť lúču odrazí späť a časť prejde ďalej, čím dochádza k mnohonásobnému odrazu. Dochádza k oddeleniu určitej vlny zo svetelného lúču pri každom odraze. Vlny sa od seba odlišujú amplitúdou. Tento typ filtra sa využíva v technológii WDM.

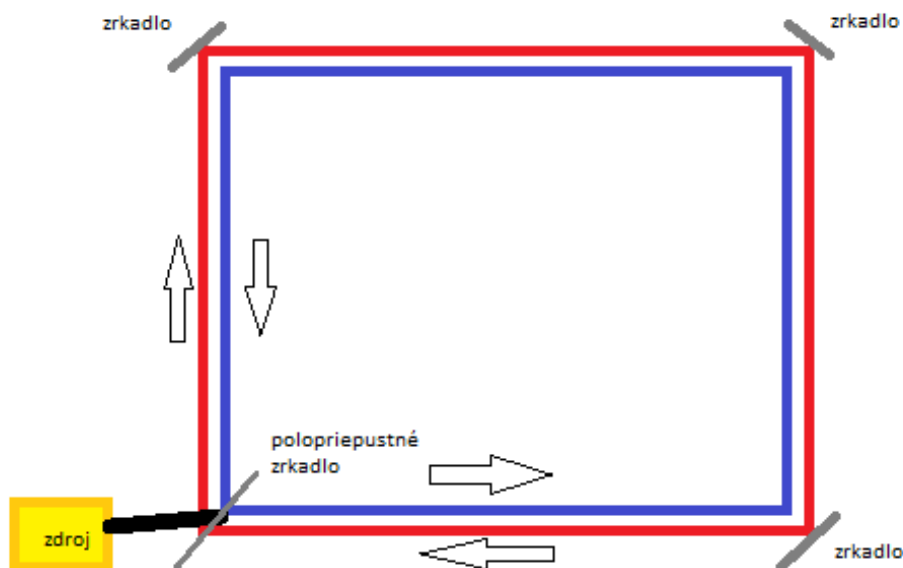


Obrázok 2.5: Fabry-Perotov interferometer

Na obrázku 6 si môžeme vysvetliť princíp Fabry-Perotov interferometer, kde d nám udáva vzdialenosť medzi zrkadlami a θ predstavuje uhol, pod ktorým vstupuje paprsok do interferometra.

2.3.2 Sagnacov interferometer

Podobne ako pri Mach-Zennderovom filtri, lúč zo zdroja prechádza polopriepustným zrkadlom, kde následne je časť lúča odrazená a časť prechádza ďalej cez zrkadlo. Z tohto dôvodu je lúč rozdelený na dva lúče. Následne sú lúče odrážané od niekoľkých plnohodnotných zrkadiel. Jeden lúč je šírený v smere hodinových ručičiek a druhý proti smere hodinových ručičiek. Je to vlastne rotácia dvoch lúčov proti sebe. Oba lúče sa spájajú potom v prvom polopriepustnom zrkadle, kde boli rozdelené a sú nasmerované do detektora. Každý lúč má iný fázový posun. A z toho dôvodu, že lúč, ktorý smeruje v smere hodinových ručičiek musí prejsť väčšiu vzdialenosť, pretože cesta k detektoru je dlhšia ako cesta ktorú má lúč v proti smere hodinových ručičiek. Využitie môžeme nájsť aj v optických gyroskopoch alebo pri výpočtoch polohy pomocou GPS.



Obrázok 2.6: Sagnacov interferometer

2.3.3 Michelsonov interferometer

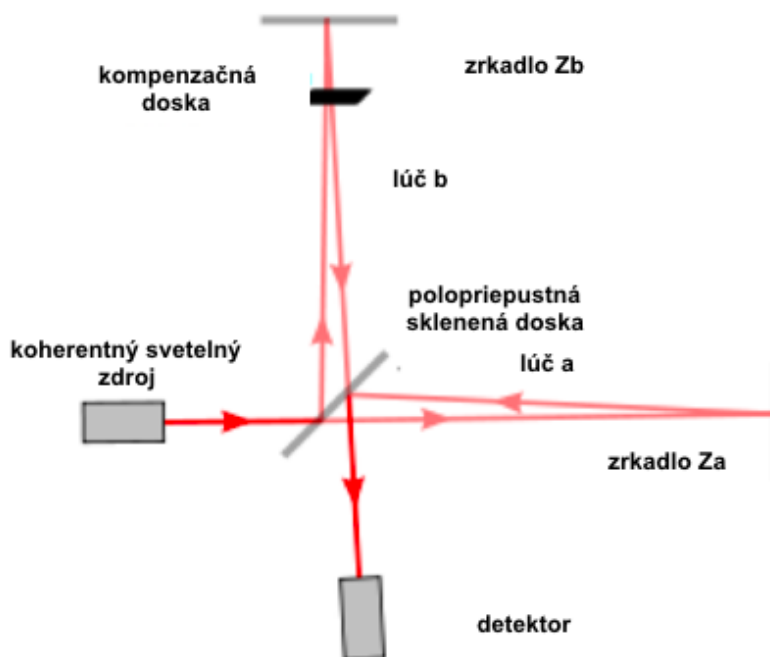
Filter navrhnutý Albertom Abrahamom Michelsonom. Tento filter je zložený z polopriepustnej sklenenej dosky, kompenzačnej dosky, a dvoch zrkadiel. Lúč pochádzajúci z koherentného žiarenia dopadá na polopriepustnú sklenenú dosku pod uhlom 45° , kde sa následne rozdelí na dva lúče.

Prvý lúč - *a* - prechádza ďalej cez polopriepustnú sklenenú dosku a dopadá kolmo na prvé zrkadlo Z_a , kde je odrazený a lúč putuje späť k polopriepustnej sklenenej doske. Od tejto dosky je lúč odrazený a putuje do detektora.

Druhý odrazený lúč - *b* - putuje rovnakým princípom ako prvý lúč, len s tým, že sa odrazí od polopriepustnej sklenenej dosky a následne sa odrazí od druhého zrkadla Z_b . Po odrazení prechádza cez polopriepustnú sklenenú dosku do detektora.

Lúč - *a* a lúč - *b* sa znova stretnú v detektore, kde spolu interferujú. Medzi polopriepustnú sklenenú dosku a zrkadlo Z_a sa vkladá kompenzačná doska, keďže lúč - *b* prešiel cez polopriepustnú sklenenú dosku celkom trikrát. Pokiaľ budú mať oba lúče rovnakú vzdialenosť od polopriepustnej sklenenej dosky k zrkadlám, znova sa stretnú tam kde sa rozdelili čiže polopriepustnej sklenenej doske. Ak posunieme Z_a zrkadlo, kde dopadá lúč - *a* o vzdialenosť d , dráhový rozdiel bude:

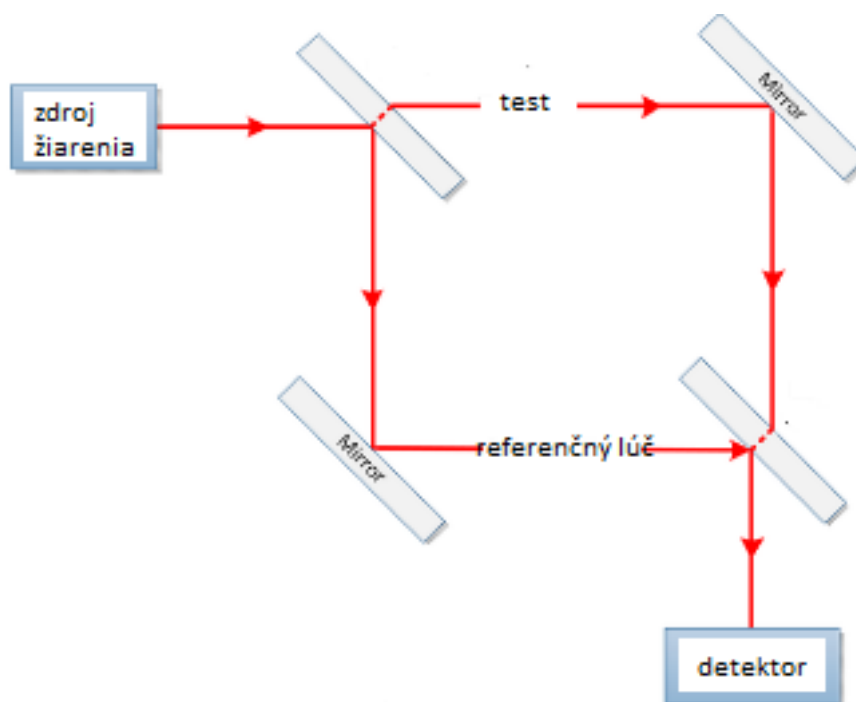
$$\Delta I = 2 \times I \quad (2.3)$$



Obrázok 2.7: Michelsonov interferometer

2.3.4 Mach-Zehnderov interferometer

Mach-Zehnder filter filter je zložený z dvoch polopriepustných zrkadiel a dvoch plnohodnotných zrkadiel. Ako zdroj je použité znova koherentné žiarenie. Lúč z tohto zdroja je rozdelený na dva lúče po priechode polopriepustného zrkadla. Časť lúča sa teda odrazí od polopriepustného zrkadla a časť prechádza ďalej cez polopriepustné zrkadlo. Lúče sú následne odrazené od plnohodnotných zrkadiel a spoja sa v polopriepustnom zrkadle, pokiaľ prešli rovnako dlhú dráhu. Následne z polopriepustného zrkadla prechádza lúč do detektora, kde je vyhodnotený fázový posun. Celý princíp Mach-Zehnderovho filtra je možný vidieť na obrázku 2.7.



Obrázok 2.8: Mach-Zehnderov interferometer

3 Peltierov článok

Peltierov článok je zostavený na základe Peltierovho javu. Peltierov jav, objavil Jean C. Peltier v roku 1834. Peltierov článok je elektronická súčiastka, kde pri privedení jednosmerného napätia na jeho póly, sa začne jedna strana zohrievať a druhá zas naopak chladiť (Peltierov Jav).



Obrázok 3.1: Peltierov článok

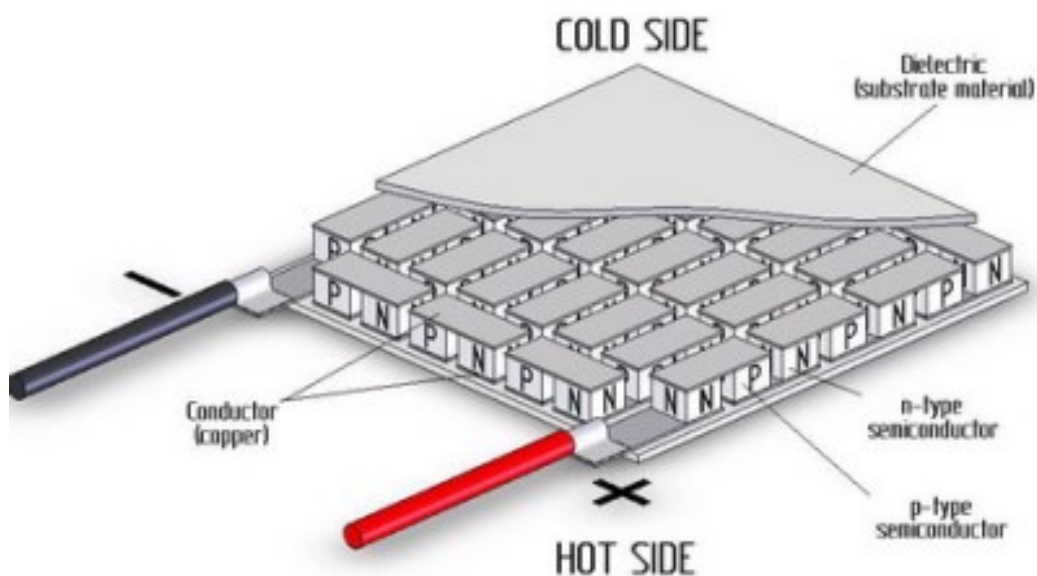
Pri ochladení jednej strany článku a zohriatí druhej strany článku, vzniká na póloch elektrický prúd (Seebeckov jav). Nevýhodou týchto článkov je veľká spotreba energie, to znamená, že je potrebný vyšší chladiaci výkon ako vyžaduje samostatné chladené zariadenie. Efekt Peltierovho článku si môžeme vysvetliť nasledovne: elektróny zrýchľujú alebo spomaľujú pod vplyvom kontaktného rozdielu potenciálu. Kinetická energia elektrónov sa zvyšuje a následne sa zmení na teplo. To nastáva ak sa plocha článku zohrieva, na druhej strane ak sa plocha článku ochladzuje, je to spôsobené tým, že kinetická energia sa znižuje a teplota klesá. Článok pracuje s nízkou účinnosťou, väčšinou je to v pomere (ohrievací/chladiaci výkon) 1,5 až 2,5, pri nulovom rozdieli teplôt. Pokiaľ sa rozdiel teplôt bude zvyšovať bude sa zvyšovať aj pomer medzi chladiacim a ohrievacím výkonom ale účinnosť sa bude znižovať.



Obrázok 3.2: Prierez Peltierovým článkom

Na obrázku 3.2 je zobrazený kolmý prierez Peltierovho článku, na plus a mínus je privedené napätie na základe, ktorého sa bude jedna strana článku zohrievať a druhá chladiť alebo naopak, to závisí na polarite napätia pripojeného na článok, “ochladzovaná strana” a “zohrievaná strana” sú keramické platne článku Peltierovho článku, sú vyrobené z keramiky aby mali dobrú tepelnú vodivosť. N a P sú polovodiče, ktoré sú navzájom elektricky spojené vodivým materiálom. Polovodičom typu N tečie prúd z teplej strany na studenú a cez polovodič typu P tečie prúd zo studenej strany na teplú.

Peltierov článok je pomerne malých rozmerov, zložených z nehybných častí. Celý článok sa skladá z paralelne a sériovo prepojených termočlánkov v matici, ktoré sú uložené medzi dvoma keramickými doskami.



Obrázok 3.3: Zloženie Peltierovho článku

3.1 Výhody a nevýhody Peltierových článkov

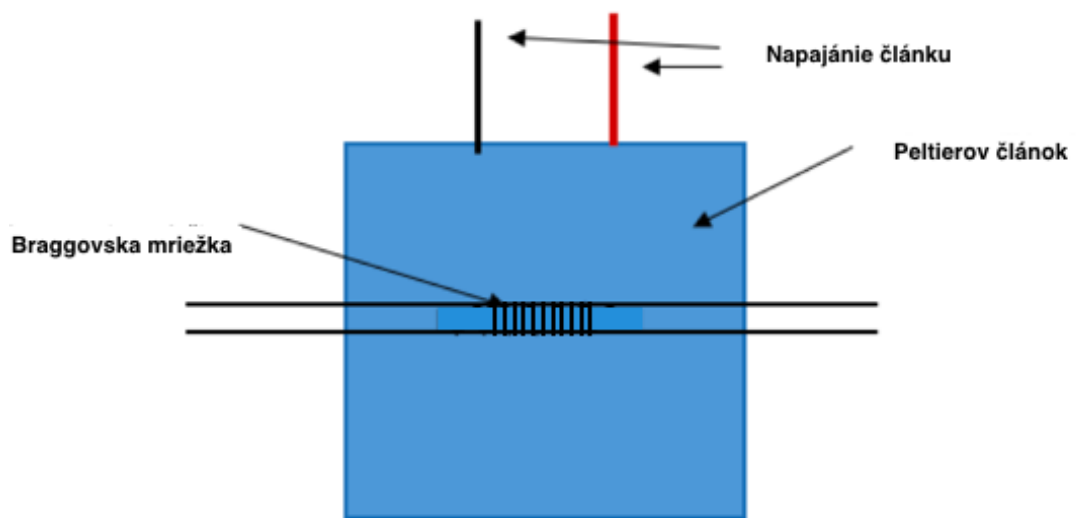
Peltierov článok má svoje výhody a nevýhody. Medzi výhody sa dá zaradiť jeho veľkosť, od 100 do 3600 mm² a hrúbka približne 3 až 6 mm. Ďalej jeho výhody môžu byť životnosť, jednoduchá regulácia, možnosť opačného javu, to znamená, možnosť prehodenia chladenej strany so stranou zohrievanou a naopak, je bez údržby a hluku. Medzi jeho nevýhody však patrí cena v prípade potreby vyššieho výkonu, nižšia účinnosť oproti chladiacim kompresorom.

3.2 Využitie Peltierových článkov

Peltierové články majú v dnešnej dobe všestranné využitie v rôznych odvetviach. Jedným z príkladov, kde sa dá s týmito článkami stretnúť sú odvlhčovače. Základom je Peltierový článok a na každej jeho strane sú osadené hliníkové pasívne chladiče. Na tieto chladiče je privádzaný vzduch z miestnosti pomocou ventilátora, účinkom Peltierovho článku je tento vzduch ochladzovaný. Následne dochádza k vyzrážaniu vlhkosti zo vzduchu na povrch chladič. Voda stečie do nádržky. Ochladený

vzduch prechádza ďalej, kde je druhou stranou Peltierovho článku ohriaty a vypustený do miestnosti. Ďalej sa môže Peltierov článok využívať ako chladenie procesorov v počítačoch.

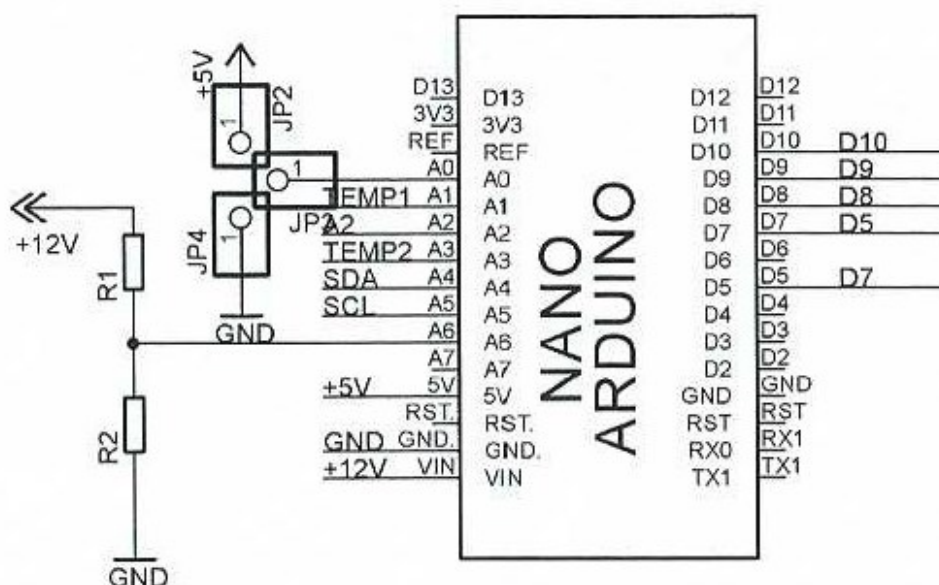
V tejto práci je Peltierov článok využívaný na ohrievanie a ochladzovanie Braggovskej mriežky, kde pod vplyvom tohto článku nastane deformácia Braggovskej mriežky, čiže sťahovanie a natáhovanie mriežky, čím sa zväčšuje a zmenšuje perióda mriežky. Peltierov článok je teda pripojený na základnú dosku, prostredníctvom ktorej sa nastavuje napätie na vstupe do článku v požadovanom rozmedzí a tým sa článok zohrieva popripade chladí na požadovanú teplotu.



Obrázok 3.4: Využitie Peltierovho článku s Braggovskou mriežkou v BP

4 Návrh laditeľného filtra založeného na Braggovskej mriežke

Cieľom tejto práce je návrh a realizácia laditeľného filtra založeného na Braggovskej mriežke. Laditeľnosť Braggovskej mriežky je možné dosiahnuť zmenou teploty, ktorá vplýva na jej deformáciu, to znamená, čím je teplota vyššia tým sa zväčšuje perióda mriežky a zas naopak, čím znižujeme teplotu tým sa znižuje perióda mriežky. Na dosiahnutie zmeny periódy mriežky je Braggovská mriežka prilepená na zdroj tepla, v práci je to prostredníctvom Peltierovho článku. Na lepšie odvádzanie tepla je článok pripevnený na hliníkový chladič spolu s ventilátorom. Peltierov článok je teda ovládaný pomocou potenciometra na základnej doske. Jadro základnej dosky tvorí Arduino Nano V3.1, ktorého vstupy a výstupy sú zobrazené na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1: Zapojenie Arduino Nano na základnej doske

Na základnú dosku laditeľného filtra je privedených 12V. Na zobrazovanie potrebných hodnôt, ako je nastavená vlnová dĺžka Braggovskej mriežky a aktuálna teplota na Peltierovom článku sa zobrazujú prostredníctvom OLED displeja s rozlíšením 128x64 a o uhlopriečke 0,96" napájaným +5V a riadený po zbernici I2C.

Arduino Nano je Open-Source platforma pre jednoduchý návrh a vývoj elektronických programovateľných zariadení – minimalizovaná vývojová doska s mikrokontrolérom AVR ATmega328. Pre možnosť programovania a na výstup do počítača slúži konektor mini USB. Doska obsahuje 14 digitálnych vstupov (6 použiteľných ako PWM výstup) a 8 analógových výstupov.

Napätie 12V na Arduino je privedených na vstup VIN. Displej je pripojený na vstupy A4 a A5. Na výstup D10 je pripojený bipolárny tranzistor typu NPN so spoločným emitorom BC547,

slúži na zopínanie relé. K ovládaniu tohto typu tranzistora stačí menší výkon ako pri zapojení so spoločnou bázou. K základnej doske je ďalej privedený senzor Dallas, ktorý meria teplotu na Peltierovom článku. Pripojený je na vstup Arduina A3. Ovládanie teploty je realizované pomocou potenciometra, ktorý je pripojený na vstup A0 a výstup z Arduina +5V. Potenciometer má nulovú hodnotu v strede medzi maximálnym a minimálnym otočením, a to z dôvodu dosiahnutia väčšieho rozptylu teplôt. To znamená, že pri pohybe potenciometra na ľavú stranu budeme Peltierov článok ochladzovať a naopak na pravú stranu zohrievať. Tento spôsob ovládania je dosiahnutý pomocou relé, ktoré mení polaritu napätia na vstupe do Peltierovho článku. Na základnej doske je využívaný taktiež tranzistor MOSFET IRL540N. Základom tejto súčiastky je polovodičová platnička typu P a v nej sú uložené dve vrstvy N, ktoré tvoria emitor a kolektor. Na základnej doske sú použité dva takéto tranzistory, jeden ktorý prepúšťa napätie do Peltierovho článku a druhý na ventilátor. MOSFET sa líši od bipolárneho tranzistora tým, že bipolárny tranzistor je ovládaný prúdom, zatiaľ čo MOSFET je ovládaný napätím.



Obrázok 4.2: *Arduino Nano V3.1 použité na doske plošného spoja*

4.1 Programovanie Arduino Nano

Na programovanie Arduino Nano bol použitý softvér Arduino IDE. Je to softvér, pomocou ktorého je možné písať programy pre túto vývojovú dosku. Pokiaľ je program hotový, odošle sa do pripojenej vývojovej dosky Arduino. Následne je program na dosku nahraný a spustený.

Prostredníctvom softvéru Arduino IDE je možné spravovať nainštalované knižnice. Sú to priečinky, ktoré združujú viac súborov so zdrojovými kódmi. Vďaka nim je potom zdrojový kód prehľadnejší a jednoduchší na pochopenie.

V bakalárskej práci sa pracuje s knižnicami pre komunikáciu so senzorom na teplotu Dallas a OLED displejom. Tento displej poskytuje zobrazenie aktuálnej teploty na Peltierovom článku, polohu potenciometra a nastavenú vlnovú dĺžku.

Hodnoty zo senzoru Dallas sú v programe prekonvertované na °C. Regulácia teploty na Peltierovom článku je vykonávaná prostredníctvom potenciometra. Jeho hodnota otočenia sa v programe konvertuje na rozsah v percentách. Ak hodnoty potenciometra nadobúdajú záporné hodnoty, na relé pin sa pustí napájanie, inak sa na relé pin napájanie nepustí.

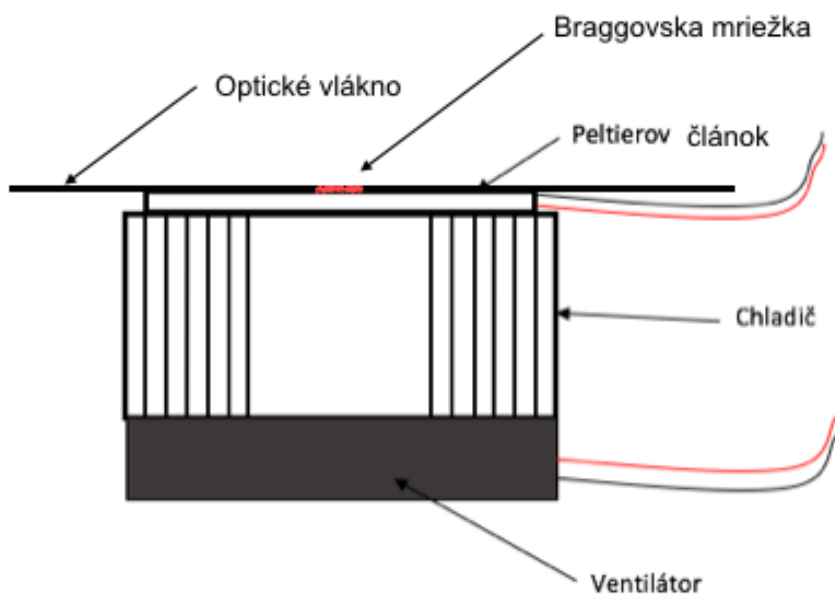
Podľa navrhutej schémy je na začiatku programu potrebné definovať vstupy a výstupy na Arduino, prostredníctvom ktorých sú ovládané jednotlivé súčiastky na základnej doske filtra.

Hodnoty na displej sa zobrazujú v určitom časovom intervale. O tento interval sa stará pomocná premenná – počítadlo.

Ak sú známe hodnoty z počiatočnej vlnovej dĺžky λ_0 , teplotného koeficientu k_T a rozdielu izbovej teploty a teploty na Peltierovom článku ΔT , vie program vypočítať následne zmenenú vlnovú dĺžku Braggovskej mriežky podľa vzťahu:

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0 + (k_T \times \Delta T)}{1000}. \quad (4.1)$$

Peltierov článok je pripojený pomocou svoriek na základnú dosku laditeľného filtra spolu s ventilátorom, tak ako je to na obrázku 4.3.

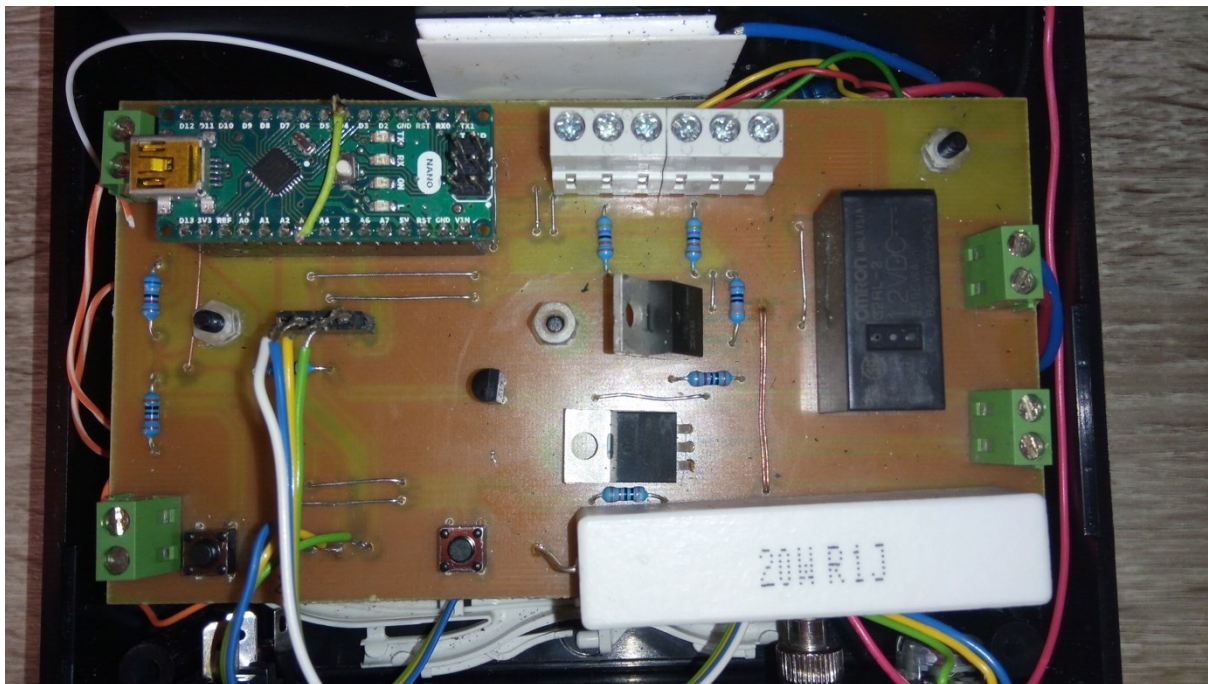


Obrázok 4.3: Zapojenie Peltierovho článku s chladičom a ventilátorom

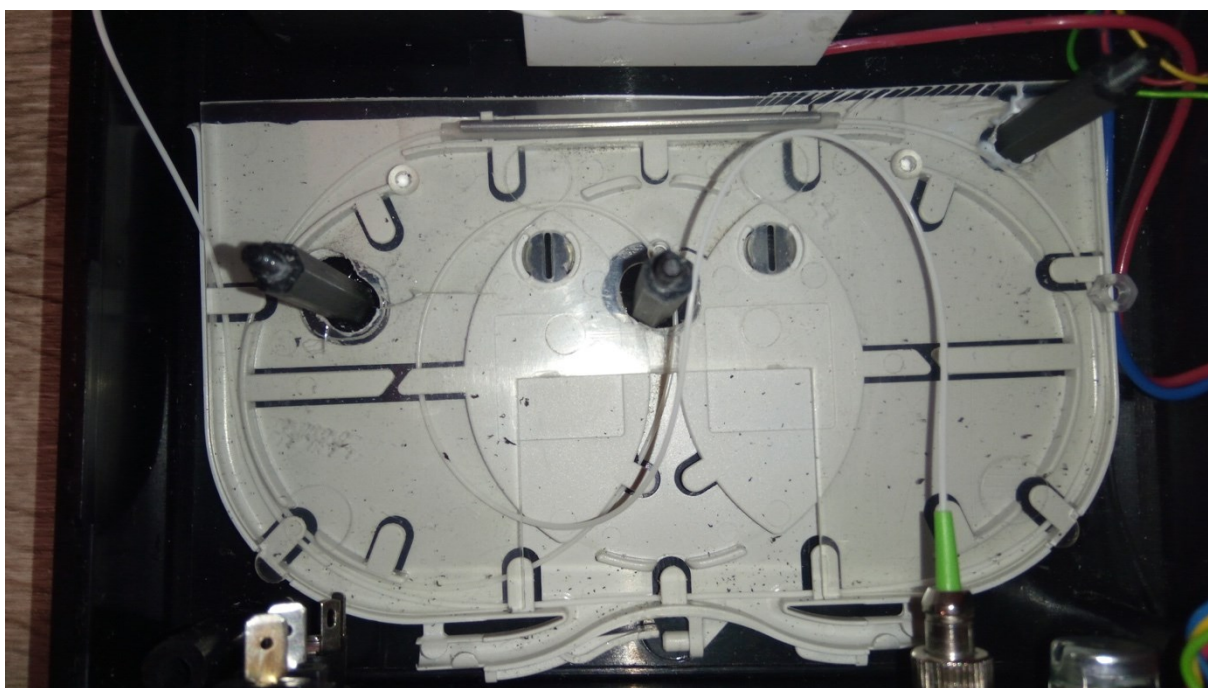
Súčiastky použité pri realizácii laditeľného filtra na doske plošného spoja:

- potenciometer 10K,
- OLED displej ER-DO1286496BY,
- ARDUINO NANO V3.1,
- BC547,
- 0R1/20W,
- IRL540N,
- RELÉ G2RL-2-12DC,
- odpory - 2x 1k, 2x 10k, 68k, 330, 4k7,

- senzor teploty Dallas - DS18B20.



Obrázok 4.4: Základná doska laditeľného filtra uložená v krabičke



Obrázok 4.5: Uloženie prírodného optického vlákna v kazete vo vnútri krabičky laditeľného filtra

5 Overenie funkčnosti laditeľného filtra

Pre overenie funkčnosti vytvoreného laditeľného filtra, bolo potrebné najskôr vykonať kalibráciu Braggovskej mriežky.

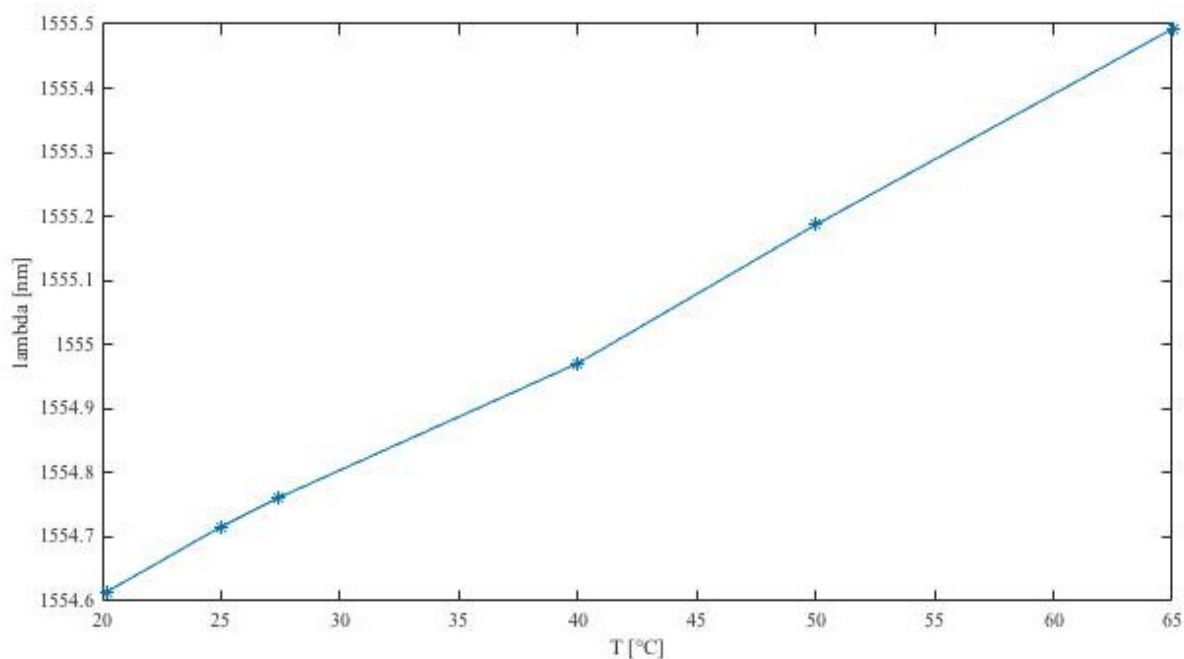
Po kalibrácii Braggovskej mriežky nasledovalo overenie funkčnosti navrhnutého laditeľného filtra. Pomocou Peltierovho článku, vplyvom teploty na Braggovskú mriežku bolo dosiahnuté nastavovanie požadovanej vlnovej dĺžky a pomocou spektrálneho analyzátora bolo možné zistiť chybu merania navrhnutého filtra.

5.1 Kalibrácia Braggovskej mriežky

Kalibrácia Braggovskej mriežky bola vykonaná pomocou spektrálneho analyzátora Thorlabs OSA-203. Na začiatku bolo potrebné definovať počiatočnú teplotu T_0 a určiť Braggovskú vlnovú dĺžku λ_0 . Počiatočná vlnová dĺžka sa určovala pri izbovej teplote 21,75 °C, čo predstavuje počiatočnú teplotu potrebnú pre výpočet zmenenej vlnovej dĺžky. Zo spektrálneho analyzátora sa po určitom čase odčítala aktuálna vlnová dĺžka Braggovskej mriežky a z týchto hodnôt sa následne vypočítal priemer, čo predstavovalo počiatočnú vlnovú dĺžku λ_0 . Teplomer pripojený k základnej doske navrhnutého filtra meria teplotu na dve desatinné miesta a teplota v miestnosti kolísala, preto bolo potrebné dbať na stálu teplotu a to 21,75 °C. Následne bola premeraná závislosť zmeny vlnovej dĺžky na zmenu teploty. Zvyšovaním teploty na Peltierovom článku sa menila vlnová dĺžka. Na Peltierovom článku sa nastavila najnižšia možná teplota (20,19 °C) a odčítala sa hodnota Braggovskej vlnovej dĺžky zo spektrálneho analyzátora. Vlnová dĺžka Braggovskej mriežky sa odčítala znova pri ďalších piatich hodnotách teploty, a to: 25, 27,44, 40, 50 a 65 °C. Z nameraných hodnôt sa vypočítala ΔT a $\Delta \lambda$. Na základe týchto hodnôt bolo možné vypočítať teplotný koeficient k_T podľa vzorca:

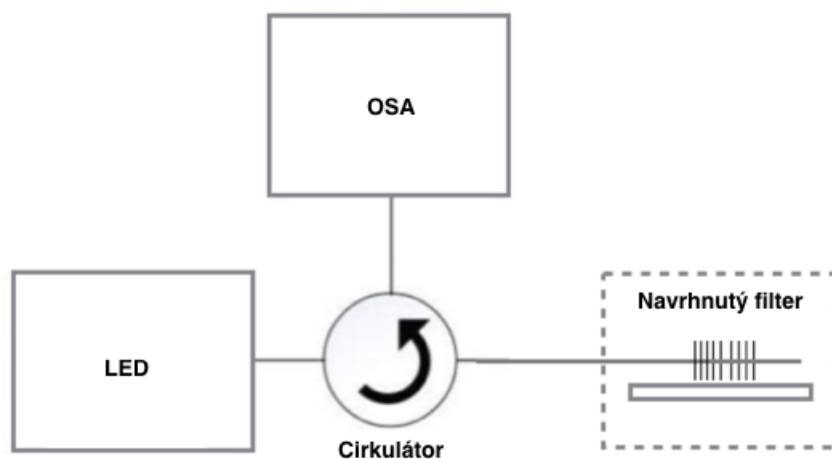
$$k_T = \frac{\Delta \lambda}{\Delta T} \quad (5.1)$$

Teplotný koeficient po dosadení hodnôt do vzorca vyšiel 19,59 pm a nameraná počiatočná vlnová dĺžka bola 1554,6662 nm. Z grafu na obrázku 5.1 je vidieť ako sa vlnová dĺžka Braggovskej mriežky s rastúcou teplotou postupne zvyšovala.



Obrázok 5.1: Graf vplyvu teploty na vlnovú dĺžku Braggovskej mriežky

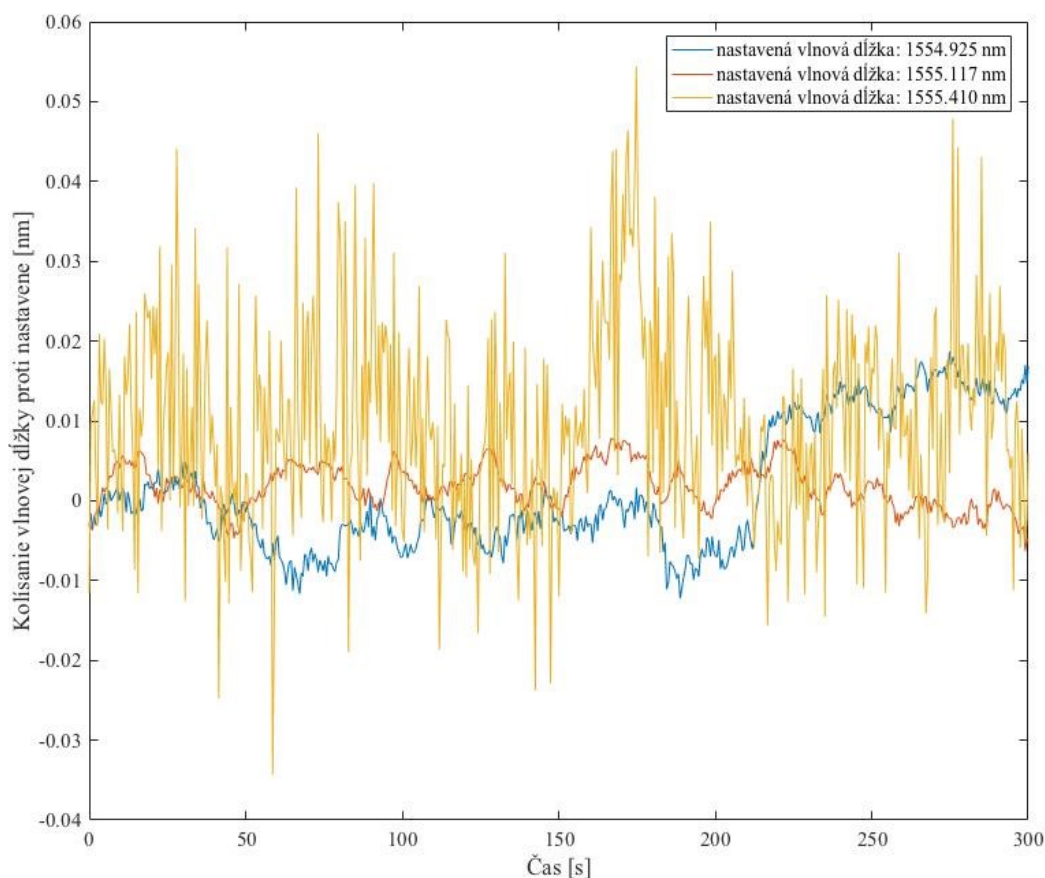
Optické vlákno, na ktorom sa nachádzala kalibrovaná Braggovská mriežka, bolo pripojené na cirkulátor, ktorý slúži k zlúčeniu alebo oddeleniu optického signálu na rovnakej vlnovej dĺžke. Svetlo je potom smerované od portu k portu iba jedným smerom. Cirkulátor je ďalej napojený na spektrálny analyzátor, na ktorom sa zobrazuje aktuálna vlnová dĺžka a na zdroj svetla. Toto zapojenie je zobrazené na obrázku 5.2.



Obrázok 5.2: Schéma zapojenia pre kalibráciu Braggovskej mriežky

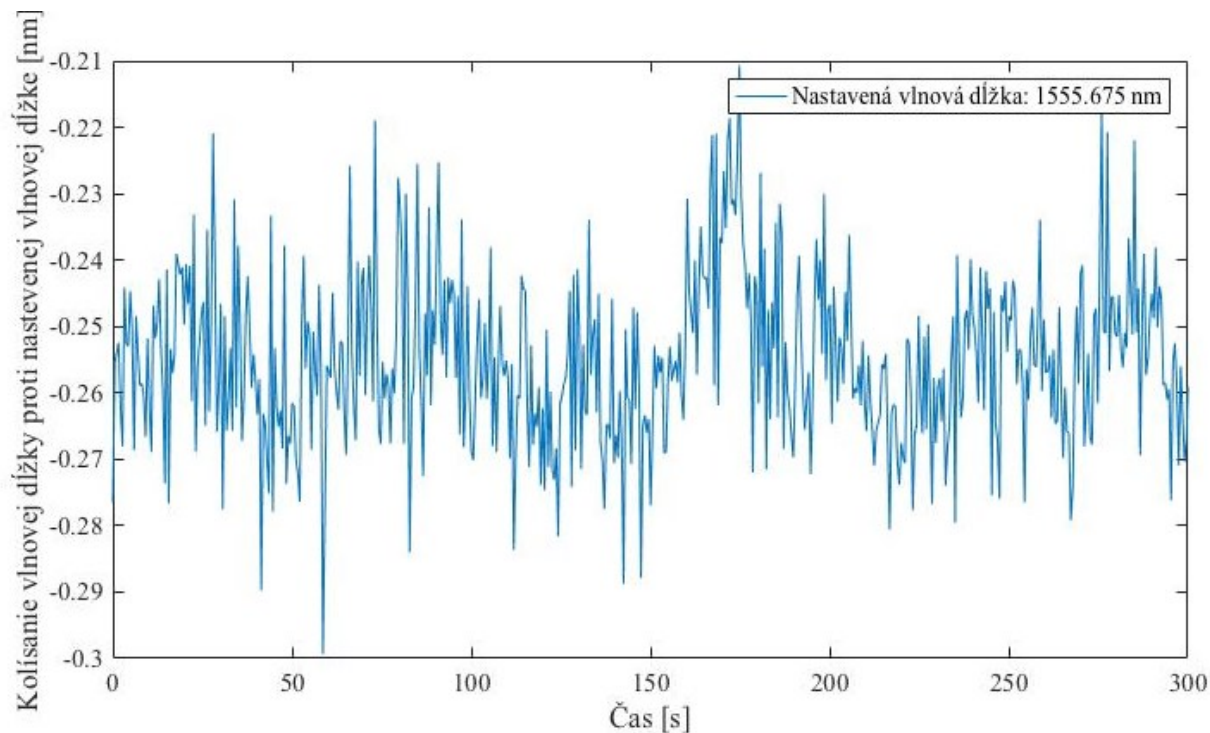
5.2 Časová stálosť vlnovej dĺžky

V tejto časti merania bolo potrebné zistiť stálosť pre nastavenú vlnovú dĺžku za daný čas. V grafe na obrázku 5.3 sú zobrazené nastavené vlnové dĺžky 1554,925, 1555,117 a 1555,410 nm. Je vidieť, že vlnová dĺžka kolísala. Najväčší rozkmit nastal pri nastavenej vlnovej dĺžke 1555,410 nm, čo bolo 0,09 nm. Príčinou bolo neustále zahrievanie a opätovné ochladzovanie Peltierovho článku, kde je dosť zložitá udržať stálu teplotu. Pri vlnovej dĺžke 1554,925 nm bol rozkmit vlnovej dĺžky najväčší pri 212 sekunde, kde došlo k rozkmitu o 0,017 nm z dôsledku náhlej zmeny teploty na Peltierovom článku. Pri vlnovej dĺžke 1555,117 došlo k najväčšiemu rozkmitu vlnovej dĺžky o 0,013 nm, čo bol najmenší rozkmit z nastavených vlnových dĺžok.



Obrázok 5.3: Graf časovej stálosti pri nastavenej vlnovej dĺžke

V grafe na obrázku 5.4 je zobrazená nastavená vlnová dĺžka 1555,675 nm samostatne, kvôli veľkému skoku vlnovej dĺžky o -0,255 nm pri začatí merania časovej stálosti vlnovej dĺžky. Pri meraní tejto vlnovej dĺžke došlo k najväčšiemu rozkmitu vlnovej dĺžky o 0,089 nm.



Obrázok 5.4: Graf časovej stálosti pre vlnovú dĺžku 1555.675 nm

5.3 Nastaviteľný rozsah vlnovej dĺžky laditeľným filtrom

V tomto meraní bolo potrebné zistiť maximálny možný rozsah nastavenia vlnovej dĺžky na laditeľnom filtri.

Pri meraní bola dosiahnutá maximálna možná nastavená vlnová dĺžka 1556,456 nm pri teplote na Peltierovom článku 99,94 °C. Pri tejto hodnote boli dosiahli najlepšie hodnoty vlnovej dĺžky pri ustálenej teplote na Peltierovom článku. Ak sa teplota ďalej zvyšovala, vlnová dĺžka Braggovskej mriežky sa nedokázala ustáliť a naopak začala klesať, čo bolo spôsobené vplyvom teploty z druhej strany Peltierovho článku. Naopak minimálna možná nastaviteľná vlnová dĺžka bola 1554,660 nm pri teplote 21,44 °C na Peltierovom článku. Na filtri bolo možné nastaviť aj nižšiu hodnotu vlnovej dĺžky, no pri znižovaní teploty pod 21 °C na Peltierovom článku, začala teplota po pár sekundách stúpať, čo bolo spôsobené malým ochladzovaním Peltierovho článku ventilátorom. Nastavenie vlnovej dĺžky je ovplyvnené taktiež vonkajšou teplotou. Čím bude vonkajšia teplota ovzdušiu nižšia, tým sa bude dať nastaviť nižšia hodnota vlnovej dĺžky, no pokiaľ bude vonkajšia teplota vyššia, nebude sa môcť dať nastaviť nízka hodnota vlnovej dĺžky, kvôli slabému ochladzovaniu Peltierovho článku.

Tabuľka 5.1: Nastaviteľný rozsah vlnovej dĺžky

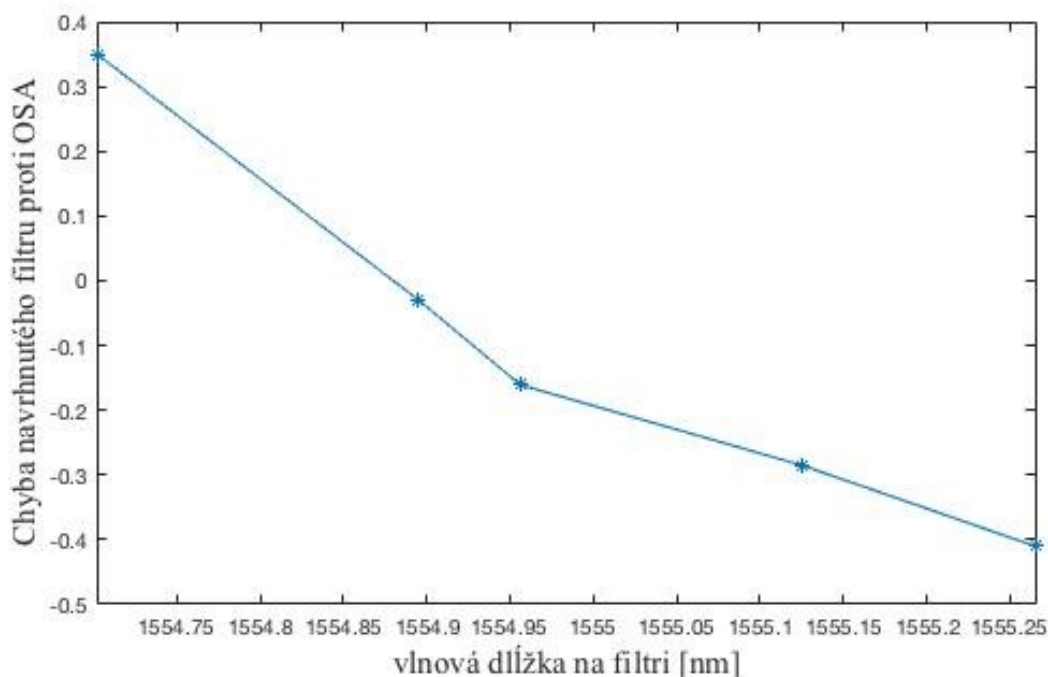
	λ_{B_OSA} [nm]	λ_{B_filtra} [nm]	Chyba merania [nm]
λ_{Max}	1556,302	1556,456	0,154
λ_{Min}	1554,352	1554,702	0,350

5.4 Absolútna chyba laditeľného filtra voči OSA

Z nameraných hodnôt laditeľným filtrom a spektrálnym analyzátorom môžeme vypočítať absolútnu chybu merania laditeľného filtra. Vykonalo sa 5 meraní pre 5 vlnových dĺžok.

$$\Delta Abs = \lambda_{B_filtra} - \lambda_{B_OSA} \quad (5.2)$$

Kde λ_{B_filtra} je vypočítaná hodnota našim navrhnutým laditeľným filtrom a λ_{B_OSA} je hodnota vlnovej dĺžky nameraná spektrálnym analyzátorom. Z grafu na obrázku 5.2 je vidieť, že náš navrhnutý laditeľný filter je najpresnejší v okolí vlnovej dĺžky 1554.85 nm. Nepresnosť laditeľného filtra je pravdepodobne spôsobená zlým teplotným koeficientom, na základe ktorého sa prepočítava zmenená vlnová dĺžka od počiatkovej. Odchýlka nepresnosti začína rásť pri zmene teploty od 40 °C po 25 °C, kde je minimum nastavenia vlnovej dĺžky a začne klesať pri zmene teploty od 40 °C do 99,94 °C čo je hranica pre maximálne nastavenie vlnovej dĺžky.



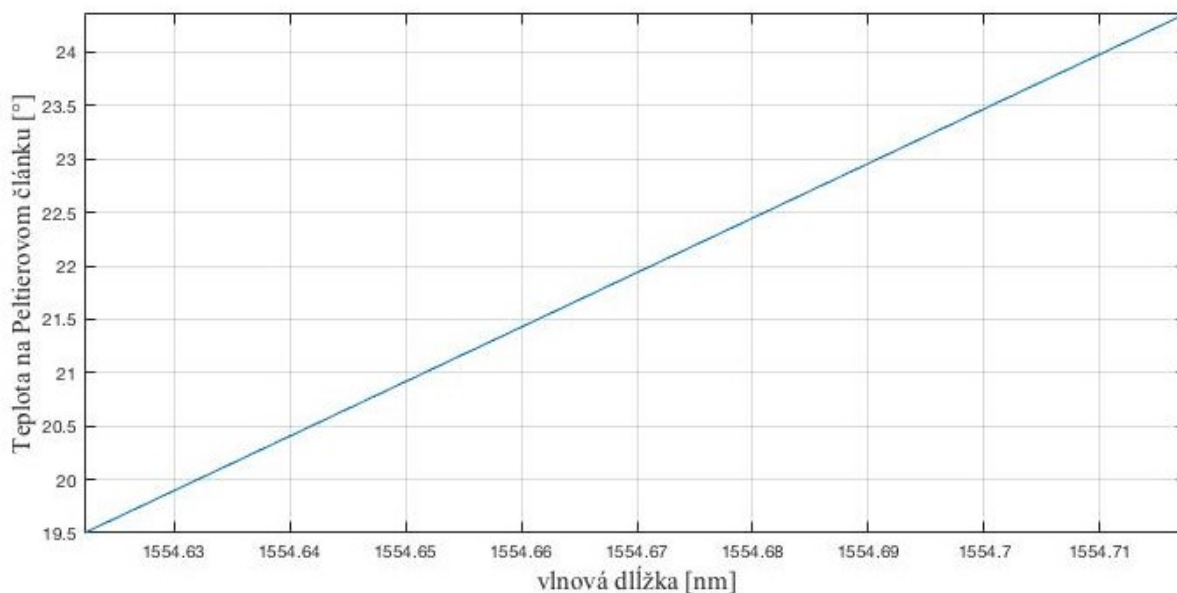
Obrázok 5.5: Absolútna chyba laditeľného filtra voči OSA

Tabuľka 5.2: Hodnoty namerané OSA a navrhnutým filtrom

λ_{B_OSA} [nm]	λ_{B_filtra} [nm]	Teplota na Peltierovom článku [°C]
1554,352	1554,702	25,19
1554,925	1554,895	40,00
1555,117	1554,956	51,44
1555,410	1555,125	67,19
1555,675	1555,265	81,00

5.5 Citlivosť nastavenia laditeľného filtra

Zmena vlnovej dĺžky sa mení na základe zmeny teploty na Peltierovom článku, ktorá sa nastavuje pomocou potenciometra. Jeho rozsah sa dá meniť od -100 % do +100 %. Zvyšovanie alebo znižovanie teploty je však nepriamo úmerné otočeniu potenciometra o 1%. Čo bolo dokázané v meraniach časovej stálosti Braggovskej vlnovej dĺžky, kde sa potenciometer nastavil na danú hodnotu a teplota kolísala. Zmenou teploty na Peltierovom článku o 1 °C sa vlnová dĺžka Braggovskej mriežky zmení o 19,5 pm, čo je možné vidieť na obrázku 5.6.



Obrázok 5.6: Zvyšovanie vlnovej dĺžky v závislosti na teplote

Záver

Optická komunikácia v bežnom živote predstavuje obrovské možnosti využiteľné práve vo svete informačných technológií a internetu, kde sa objemy prenášaných dát neustále zväčšujú. Optický filter ako neoddeliteľná súčasť optickej siete zabezpečuje filtráciu kanálov na vlnových dĺžkach.

Cieľom práce bolo na základe teoretických poznatkov problematiky optovláknových filtrov a Braggovských mriežok, vytvoriť návrh pre laditeľný filter založený na Braggovskej mriežke a následne realizovať tento návrh. Súčasťou cieľa bolo finálne experimentálne overenie funkčnosti tohto laditeľného filtra.

Braggovská mriežka tvorí základ návrhu pre laditeľný filter, ktorá bola prilepená na Peltierov článok spolu so senzorom Dallas, ktorého úlohou bolo merať teplotu. Na základe tejto teploty sa následne prepočítavala zmenená vlnová dĺžka FBG. Peltierov článok bol prilepený na chladič a pre lepšiu teplotnú stabilizáciu, dochladzovaný ventilátorom. Medzi chladič a Peltierov článok sa naniesla teplo vodivá pasta. Jej úlohou bolo odvádzať teplo z dôvodu veľkého zahrievania Peltierovho článku. Zmenenú vlnovú dĺžku Braggovskej mriežky prepočítaval program nahraný v Arduino Nano. Prostredníctvom tohto programu bolo možné ovládať navrhnutý laditeľný filter.

Na prepočítanie zmenenej vlnovej dĺžky som vykonal kalibráciu Braggovskej mriežky, stanovil teplotný koeficient a počiatočnú vlnovú dĺžku. Na väčší rozptyl teplôt v návrhu základnej dosky filtra som použil relé, ktoré zabezpečovalo zmenu polaritu napätia na vstupe do Peltierovho článku. Pri prvom spustení Arduina nastala chyba, ktorá sa prejavovala vo vypisovaní teploty na displej ako -127 °C. Chyby som následne odfiltroval v kóde Arduina a pridaním kondenzátorov na základnú dosku. Po odstránení tejto chyby bola vykonaná kalibrácia Braggovskej mriežky s použitím spektrálneho analyzátoru Thorlabs OSA203. Pri tomto meraní som vypočítal počiatočnú vlnovú dĺžku, čo bolo 1554.6662 nm, teplotný koeficient 19,59 pm a počiatočnú teplotu 21,75 °C. Po zistení týchto hodnôt som mohol vypočítať posunutie vlnovej dĺžky vplyvom teploty. Následne som vykonal časovú stabilizáciu, ktorá poukazovala na rozkmit nastavennej vlnovej dĺžky. Vypočítal som chybu merania navrhnutého filtra voči spektrálnemu analyzátoru. Pri ktorej bolo dokázané, že odchýlka pri teplotách od 51 °C je vysoká. Tá bola spôsobená zle určeným teplotným koeficientom. Pri meraní teplotnej stabilizácie teplota kolísala, čo malo za následok kolísanie vlnovej dĺžky. Pri meraní časovej stálosti vlnovej dĺžky Braggovskej mriežky pri hodnote 1555,410 nm, vlnová dĺžka výrazne kolísala až o 90 pm. Pri nastavennej vlnovej dĺžke 1555,675 nm, sa pri začatí merania časovej stability vlnová dĺžka posunula o -255 pm, to bolo zapríčinené náhlou zmenou teploty. Minimálnu možnú nastaviteľnú vlnovú dĺžku som mohol nastaviť na 1554,702 nm. Z dôvodu slabého chladenia Peltierovho článku od ventilátora, sa táto hodnota nedala nastaviť nižšia. Pri maximálnej možnej nastaviteľnej vlnovej dĺžke som došiel na hodnotu 1556,456 nm.

Stanovený cieľ mojej bakalárskej práce, ktorým bolo overenie funkčnosti laditeľného filtra som splnil, napriek tomu pre lepšie nastavenie rozsahu vlnovej dĺžky Braggovskej mriežky navrhujem použiť väčší ventilátor z dôvodu lepšieho chladenia Peltierovho článku. Na základe teoretických poznatkov a osobných skúseností riešenej problematiky navrhujem v budúcnosti použiť nový laditeľný filter, ktorý by menil rozsah vlnovej dĺžky, nie pomocou teploty, ale prostredníctvom napínania Braggovskej mriežky.

Použitá literatúra

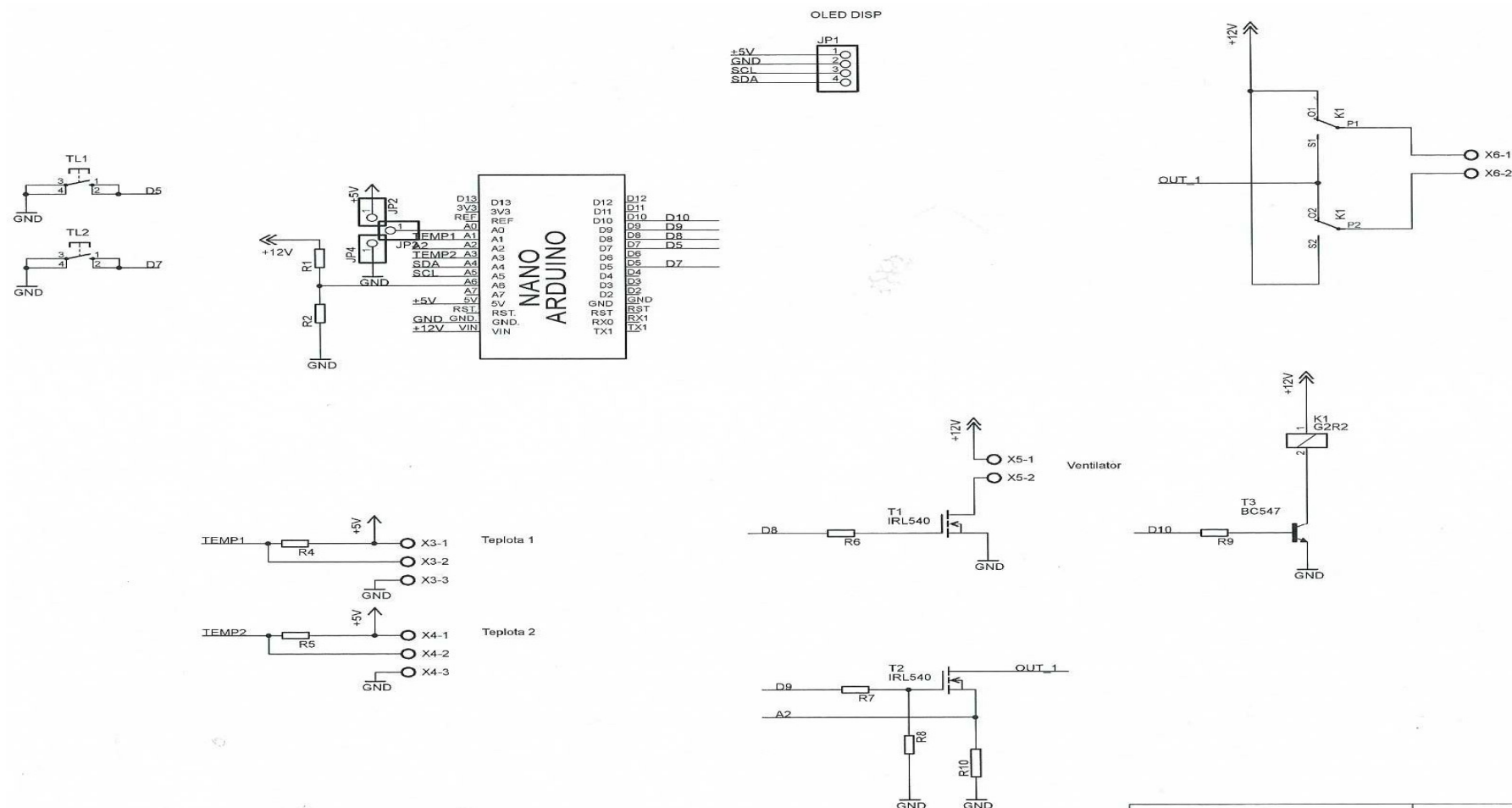
- [1] KASHYAP, Roman. *Fiber Bragg Gratings*. 1.vydanie: London: ACADEMIC PRESS, 1999. 459 s. ISBN 0-12-40056-8
- [2] OTHONOS, Andreas - KALLI, Kyriacos. *Fiber Bragg Gratings*. 1.vydanie. Norwood: ARTECH HOUSE, INC, 1999. 445 s. ISBN 0-89006-344-3
- [3] DECUSATIS, M. Casimer – DECUSATIS, Sher J. Carolyn. *Fiber Optic Essentials*. 1.vydanie. Oxford: Elsevier, 2006. 271 s. ISBN 978-0-12-208431-7
- [4] National Instruments, Fundamentals of Fiber Bragg Gratings (FBG) Optical Sensing. *ni.com* [online].
[cit. 2016-10-20]. Dostupné z: <http://forum.khnet.info/viewtopic.php?f=10&t=964#p7299>
- [5] Patents US5459799A, Tunable optical filter. [online]. [cit. 2016-10-20].
<https://www.google.com/patents/US5459799>
- [6] Wikipedia, Mach-Zehnder interferometer, *wikipedia.org* [online]. [cit. 2016-10-25].
https://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder_interferometer
- [7] NetWork, FBG filtry, *sfo.networkgroup.cz* [online]. [cit. 2016-10-25].
<http://sfo.networkgroup.cz/cs/fbg-filtry/>
- [8] Optromix, A tunable fiber Bragg grating (FBG) optical filters, *fibergratings.com* [online]. [cit. 2016-10-27].
<http://fibergratings.com/wp/uncategorized/a-tunable-fiber-bragg-grating-fbg-optical-filters/>
- [9] Patents US6373632 B1, Tunable Fabry-Perot filter. [online]. [cit. 2016-10-27].
<https://www.google.com/patents/US6373632>
- [10] Wikipedia, Interferometry, *wikipedia.org* [online]. [cit. 2016-10-28].
<https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>
- [11] Photonics, Mach-Zehnder interferometer, *photonics.com* [online]. [cit. 2016-11-1].
<https://www.photonics.com/EDU/Term.aspx?TermID=5274>
- [12] Mdpi, Applications of Optical Interferometer Techniques for Precision Measurements of Changes in Temperature, Growth and Refractive Index of Materials, *mdpi.com* [online]. [cit. 2016-11-15]. <http://www.mdpi.com/2227-7080/2/2/54/htm>
- [13] Optical spectral filters and gratings, *ftp.utcluj.ro* [online]. [cit. 2016-11-15].
https://ftp.utcluj.ro/pub/users/cemil/dwdm/dwdm_Intro/4_5311739.pdf

Zoznam príloh

PŘÍLOHA A: SCHÉMA ZAPOJENIA ZÁKLADNEJ DOSKY OVLÁDACIEHO PANELU.....	I
PŘÍLOHA B: SPEKTRÁLNY ANALYZÁTOR PRI MERANÍ KALIBRÁCIE FBG S LED	II
PŘÍLOHA C: VYHOTOVENÝ LADITEĽNÝ FILTER	III
PŘÍLOHA D: ZDROJOVÝ KÓD NAHRANÝ V ARDUINO-NANO	IV

Schéma zapojenia základnej dosky ovládacieho panelu

Příloha A: Schéma zapojenia základnej dosky ovládacieho panelu



Obrázok A.1: Schéma zapojenia

Příloha B: *Spektrálny analyzátor pri meraní kalibrácie FBG s LED*



Obrázok B.1: Spektrálny analyzátor OSA 203

Příloha C: *Vyhotovený laditelný filter*



Obrázok C.1: Vyhotovený navrhntý laditeľný filter, predná strana



Obrázok C.2: Vyhotovený navrhnutý laditeľný filter, zadná strana

Příloha D: *Zdrojový kód nahraný v Arduino-Nano*

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <stdio.h>
#include <OLED_I2C.h>

OLED myOLED(SDA, SCL, 8);
extern uint8_t MediumNumbers[];
extern uint8_t BigNumbers[];
extern uint8_t SmallFont[];

#define ONE_WIRE_BUS 4
int analogPin = 0;          // potentiometer wiper (middle terminal)
                             // connected to analog pin 3
int relePin = 10;
int PWMPin = 9;             // outside leads to ground and +5V
int percenta;
int val = 0;                // variable to store the value read
int prud = 0;
int znamienko = 0;
int pinCidlaDS = 4;-
int pocitadlo = 0;
float teplota;
float teplota2;
float ventilator = 8;

int LED = 13;
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

```
void setup() {
    myOLED.begin();
    myOLED.setFont(SmallFont);
    Serial.begin(19200);
    pinMode(relePin, OUTPUT);
    pinMode(PWMPin, OUTPUT);
    pinMode(LED, OUTPUT);

    TCCR1B=5;
    // put your setup code here, to run once:
    sensors.begin();
}

void loop() {
    // put your main code here, to
    run repeatedly:

    val = analogRead(analogPin); // read the input pin
    val = (val + analogRead(analogPin))/2;
    percenta = ((prud*100)/255);
    Serial.print(" *** ");
    if ((znamienko ==0) and (percenta>0)) Serial.print("-");
    myOLED.setFont(MediumNumbers);
    myOLED.printNumI(percenta, LEFT, 20);
    myOLED.print("%", LEFT, 20)
    myOLED.update();*/
    Serial.print(percenta); // debug value
    Serial.print("%    ");
    if (val<512) {
        prud = 255-(val/2);
        digitalWrite(relePin, HIGH);
        znamienko=0;
```

```
}  
    else  
    {  
        digitalWrite(relePin, LOW);  
        znamienko=1;  
        prud = (val-512)/2;  
    }  
    if ((val>490) and (val<530)) {analogWrite(PWMPin,  
0);digitalWrite(LED,HIGH);}else{analogWrite(PWMPin,  
prud);digitalWrite(LED,LOW);}  
    pocitadlo++;  
    if (pocitadlo>11) pocitadlo=0;  
  
    if (pocitadlo == 5) {  
        sensors.requestTemperatures();  
        teplota=sensors.getTempCByIndex(0);  
    }  
  
    if (pocitadlo == 10) {  
        sensors.requestTemperatures();  
        teplota2=sensors.getTempCByIndex(1);  
    }  
        Serial.print(teplota,2);  
        Serial.print(" °C | LAMBDA(B) = ");  
  
        myOLED.setFont(MediumNumbers);  
        myOLED.printNumI(teplota, RIGHT, 20);  
        myOLED.print("°C", RIGHT, 20)  
        myOLED.update();
```

```
float vzorec=(1554.6662+((0.01959)*(teplota-21.75)));  
Serial.print(vzorec,5);  
Serial.println(" *** ");  
  
    myOLED.setFont(BigNumbers);  
    myOLED.printNumI(vzorec, CENTER, 40);  
    myOLED.print(" nm", CENTER, 40)  
    myOLED.update();  
    myOLED.clrScr();  
  
}
```